

Минералогия. Вводные лекции.

Курс минералогии

- Базовый курс для геохимического потока, читается в течение 2-х семестров.
- Теоретическая и практическая части. В конце каждого семестра экзамен . В течение семестра на лекциях будут разнообразные контрольные работы.
- Лекции, семинарские занятия, самостоятельная работа с коллекциями.

Посещение музеев и выставок (минералогический музей им. А.Е.Ферсмана, геологический музей им. В.И.Вернадского, музей «Самоцветы», музей землеведения МГУ (включая новые экспозиции), самоцветный развал в Сокольниках и т.д.) – **бонусы**

«Минералогический университет» - публичные лекции и практикумы в ММФ (<http://geo.web.ru/druza/>)

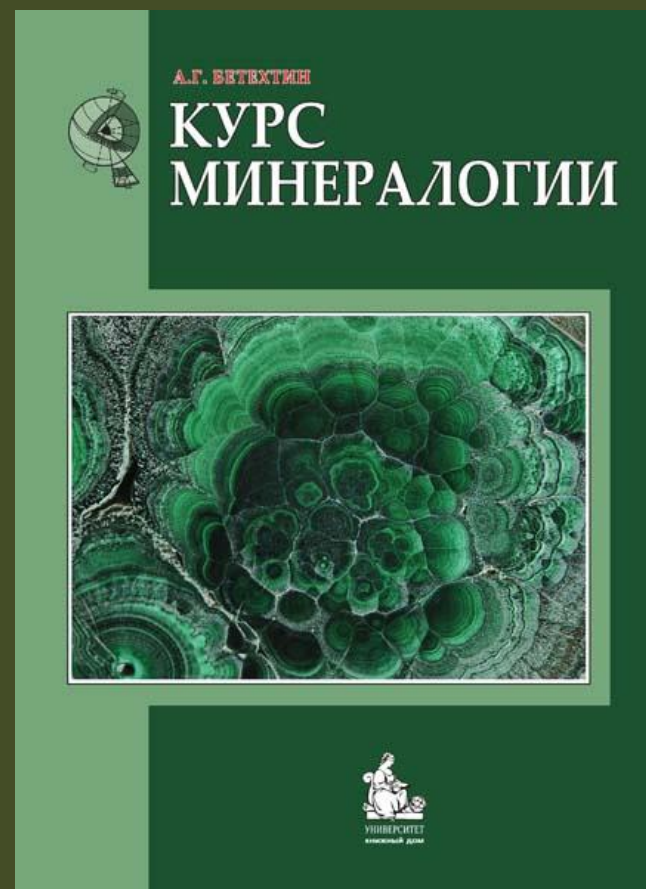
Основные учебные пособия

Булах А.Г., Кривовичев В.Г.,
Золотарев А.А.

Общая минералогия, СПб, 2008.

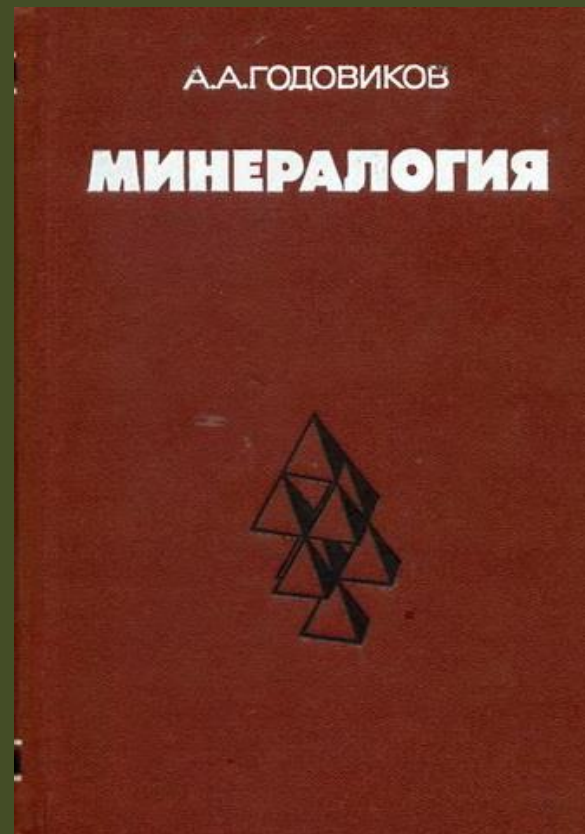


Бетехтин А.Г. Курс минералогии.
М., 2007.



Основные учебные пособия

Годовиков А.А. Минералогия.
М., Недра, 1975 и 1983.



Миловский А.В., Кононов О.В.
Минералогия. М., МГУ, 1982

Полезные ссылки

- www.mindat.org/ - база данных
- www.webmineral.ru - минералы и месторождения России и стран ближнего зарубежья, работы по геологии в электронном виде
- www.ima-mineralogy.org - IMA
- <http://www.minsoc.ru/> - РМО
- www.geo.web.ru/druza/ - находки минералов по всему миру
- www.geo.web.ru/ - все о геологии
- www.wiki.web.ru - геовикипедия

Минералы и месторождения России и стран ближнего зарубежья

гость
Вход и регистрация

Поиск: минерал

и/или месторождение

Поиск

Минералы

Введите название минерала и его часть:

Поиск

Минералы, открытые недавно

Поиск по химическому составу

Поиск по физическим параметрам

Месторождения

Введите название месторождения или его часть
(например: "Белореченское" или "Белореч")

Поиск

Месторождения на карте

Новые месторождения на сайте:

Бахмут метеорит, Северный Донбасс, Донецкая область, Украина

Андреевка метеорит, Северный Донбасс, Донецкая область, Украина

Еленовка метеорит, Южный Донбасс, Донецкая область, Украина

Форум, новые темы

Кремень. Гжель.

onlooker: Ну то, что сомневающиеся есть, это уже объявлено. Есть. Ищем подтверждающих. Потому что формально опровергнуть эту привязку достаточно трудно, если вообще возможно. Один подтверждающий находки чего-то...

Новые минералы в базе данных сайта

Almaz: То есть в статье пишем зангбоит (zangboite), это Минералы в базе данных сайта

Образец недели



Висмут

Омчикандя (Sn) месторождение, Усть-Янский район (улус), Восточная Якутия, Якутия, Россия
© Автор фото: West

Фотоотчеты



Оленьими тропами...

Путешествие на заброшенное месторождение, экспозиция в




[Help mindat.org](#) | [Log In](#) | [Register](#) | Language: English
[About Mindat](#)[Support Mindat](#)[Photos](#)[Messageboard](#)[Advanced Search](#)[More](#)

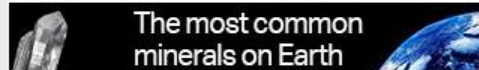
Welcome to mindat.org

Mindat.org has been running since October 2000 with the aim of building and sharing information about minerals, their properties and where they are found.

It is now the world's largest public database of mineral information with an army of worldwide volunteers adding and verifying new information daily.

The Elements and their Minerals

Explore the minerals behind the Periodic Table



Mindat News

20th July 2016 - LIVE REPORT
Visit to the Natural History Museum, London

1st July 2016
Sainte-Marie-Aux-Mines 2016 - Day 1

1st July 2016
Sainte-Marie-Aux-Mines 2016 - Day 2

23rd June 2016 - LIVE REPORT
Hong Kong mineral show - live report

13th May 2016 - LIVE REPORT
Santa Ana - West Coast Gem & Mineral Show

9th April 2016 - LIVE REPORT
Sinkankas Symposium 2016 - Roger Merk tribute -

Older News Articles

[Click here to view all older mineral news articles](#)

Photo of the Day

September 2, 2016



Zeunerite

Montoso Quarries, Ortiuel, Bagnolo Piemonte, Cuneo Province, Piedmont, Italy

Posted by Bruno Marella

Latest Members' Articles

☐ **Chris Popham - 22nd Aug 2016**
SHARKHAMPOINT IRON MINE

☐ **Chris Popham - 22nd Aug 2016**
Wheal Exmouth, Teign Valley, Devon.

☐ **Chris Popham - 22nd Aug 2016**
Little Duke Mine

New Discussions

Re: Cassiterite from Ware Weir query
07:18 2nd Sep 2016 - posted by Dale Foster

Re: Unknown green mineral with garnet
05:13 2nd Sep 2016 - posted by Wayne Corwin

Re: Unknown green mineral with garnet
05:07 2nd Sep 2016 - posted by Wayne Corwin

Dealer News

1st Sep - e-Rocks
The First Of The Month!

1st Sep - mineralman.com
Amazing Auctions ENDING NOW!

1st Sep - Weinrich Minerals, Inc.
450 Piece Update - New Auction

*Минералы – история,
классификация, характеристика
конституции и химического
состава.*

История минералогии. Предыстория

Каменный век – основа материальной культуры человека – камень (минерал)

Самые старые из известных сегодня каменных орудий (каменные отщепы, Африка) имеют возраст 2-3 млн. лет.

*Кварц, кремьнь, яшма,
нефрит, жадеит,
обсидиан – производство
оружия и инструментов.*

*Окислы и гидроокислы железа -
краски.*

Глины – гончарные изделия.



Жадеитовые топоры, Троя



История минералогии. Предыстория

Палеолит, мезолит, неолит

Неолит (кроманьонцы) освоение шлифовки, сверления и распиловки камней. Термообработка.

8-10 тыс. лет – первые разработки месторождений (Прибалтика, Англия – кремни в шахтах!; Ближний Восток – обсидиановые карьеры)

При переходе в медный (бронзовый или железный) век производство каменных орудий отходит на второй план (но они полностью не исчезают!).

Минералы – источник металлов, технологический и строительный материал, украшение, символ власти, иногда использовались в ритуальных церемониях, в качестве денег или материала для музыкальных инструментов!

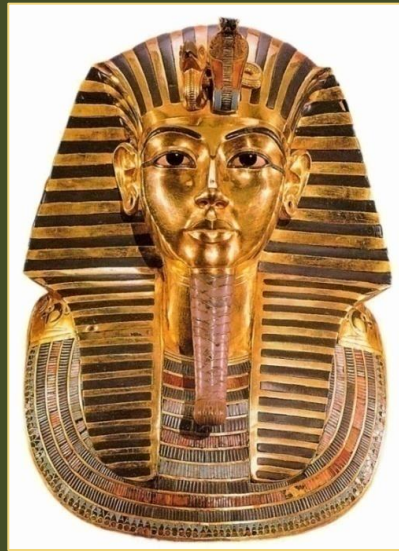
Первый выплавленный металл – медь (конец 7-го тыс., Южная Анатолия).

Древний Египет

Древний Египет – первая страна где началась систематическая добыча россыпного и коренного золота (с 4,5 тыс. до н.э., а возможно и раньше).

Долгое время Египет оставался основным (или единственным) источником золота!

Синайский п-ов – добыча меди (с 3 тыс. до н.э.).



Высочайшая культура обработки камня (скульптуры из гранитов и диоритов, резные изделия из драгоценных и поделочных камней).



Палетка фараона Нармера, IV тыс. до н. э.

Среди бус, найденных в погребениях Северного Египта и датированных примерно в 3200 лет до н. э. обнаружены девять железных бусин, источником материала которых было метеоритное железо. В нем оценено содержание Ni (6-9%) и Co (0,4-0,5%), что соответствует типичным значениям для железных метеоритов. Данная находка по крайней мере на 500



лет древнее ранее известных железных артефактов и показывает, что использование железа человеком началось за тысячелетия до открытия металлургической обработки железных руд. Заодно это объясняет и тот факт, что в каменистых пустынях в современное время количество находок железных метеоритов непропорционально мало по отношению к количеству обнаруженных каменных метеоритов (*Journal of Archaeological Science V.40, Issue 12, 2013*).



Никелистое железо в составе бус практически полностью окислено, в значительной степени сохранились не измененными кристаллы шрейберзита $(Fe, Ni, Co)_3P$.

История минералогии. Предыстория

Видимо, первым письменным источником с описаниями минералов и сведениями об их месторождения является коллективный труд «Древнее сказание о горах и морях» (Сан-Хей-Дин). Начало работе было положено около двух тысячелетий до нашей эры в древнем Китае и в течение более тысячелетия она непрерывно пополнялась.

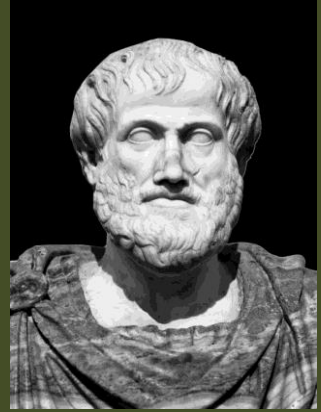
В работе описаны 17 минералов, горных пород и металлов — золото, серебро, олово, медь, железо, магнетит, азурит, сапфир, нефрит и др.

Даются сведения об их отличительных признаках и их месторождениях.

История минералогии. Предыстория

Античный мир. Древняя Греция.

Аристотель (384-322 до н.э.) – классификация природных тел. Разделил окружающий мир на три "царства" – животное, растительное и минеральное. К минеральному он отнес все, что не попадало в первые два, сформулировав тем самым исторически исходную позицию: минералы - вся неживая природа.



Теофраст (ок. 372-ок.287 до н.э.). Согласно Диогену Лаэртца, Теофрастом написаны трактаты «О металлах», «О солях, щелоке и квасцах», «Об окаменелостях», «О лавовом потоке на Сицилии», «О камнях». В последнем даются представления о образовании камней, систематизированы

известные автору минералы (главным образом, драгоценных камней) и горные породы.

История минералогии. Предыстория

Месторождения Лавриона

Первые рудные разработки - приблизительно 3100 лет до н.э.!

Пик добычи - V по IV вв до н.э.

Возобновилась эксплуатация месторождений в XIX веке.

Последняя шахта была закрыта в 1983 г.



*Античный театр в
Торикосе –
древнейший в
Греции (а возможно,
и в мире)*

Организация работ

Афинское город-государство выдавало лицензии на разработку рудников частным лицам – свободным гражданам.

Аристотель упоминает контракты на 3 года на уже действующие рудники и контракты на 10 лет на строительство новых рудников и их разработку.

Государственный контроль за разработкой рудников и чистотой производимого серебра был систематическим и очень строгим. Существовали специальные законы и особый «рудничный суд».

Концессионер Дифил был казнен за то, что в нарушение закона брал руду из оставленных целиков, создавая проблемы для дальнейшей эксплуатации рудника.



Пника (Пникс) в Афинах:
на этом холме заседал
«рудничный суд»

Основная рабочая сила – РАБЫ. На добыче и переработке лаврионских руд одновременно использовалось 10000-20000 рабов.



Добыча велась с помощью очень глубоких (до 120 м) узких вертикальных шахт (>1000) и горизонтальных выработок.

Общая длина античных выработок Лавриона > **1000 км** на шести горизонтах.

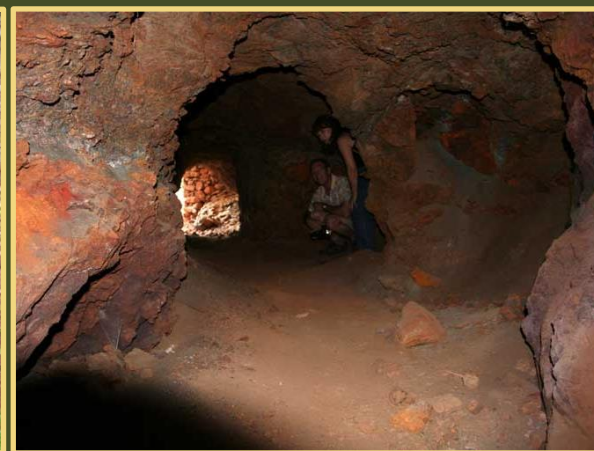
вертикальный ствол



устье штольни



горизонтальные выработки



Добыча и доставка руды



Отбойка руды (7-45% Ag-содержащего галенита + пирит + сфалерит). Разрушение породы при проходке выработок осуществлялось посредством нагрева и быстрого охлаждения



Подъем руды из шахты — вручную в кожаных мешках



Доставка руды по поверхности на «обогащательные фабрики» - на повозках

Измельчение руды



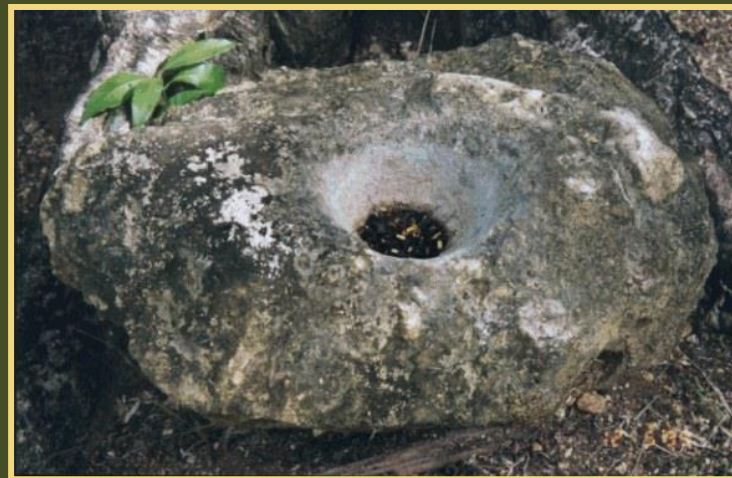
первичное дробление
МОЛОТОМ



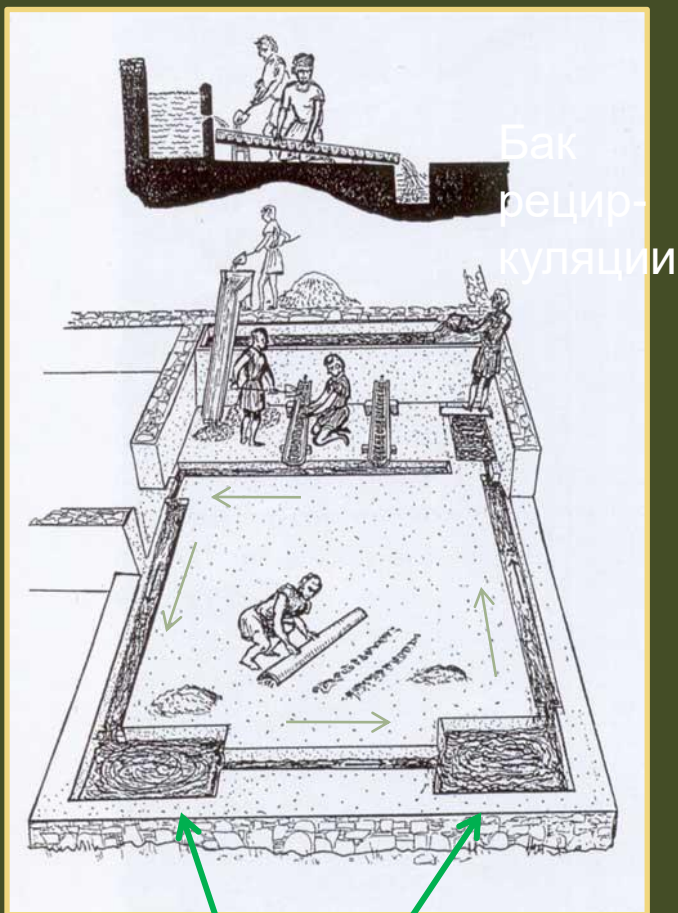
дробление до
фракции ок. 1 мм
МОЛОТКОМ



измельчение в
порошок в ступах из
мрамора или
трахита

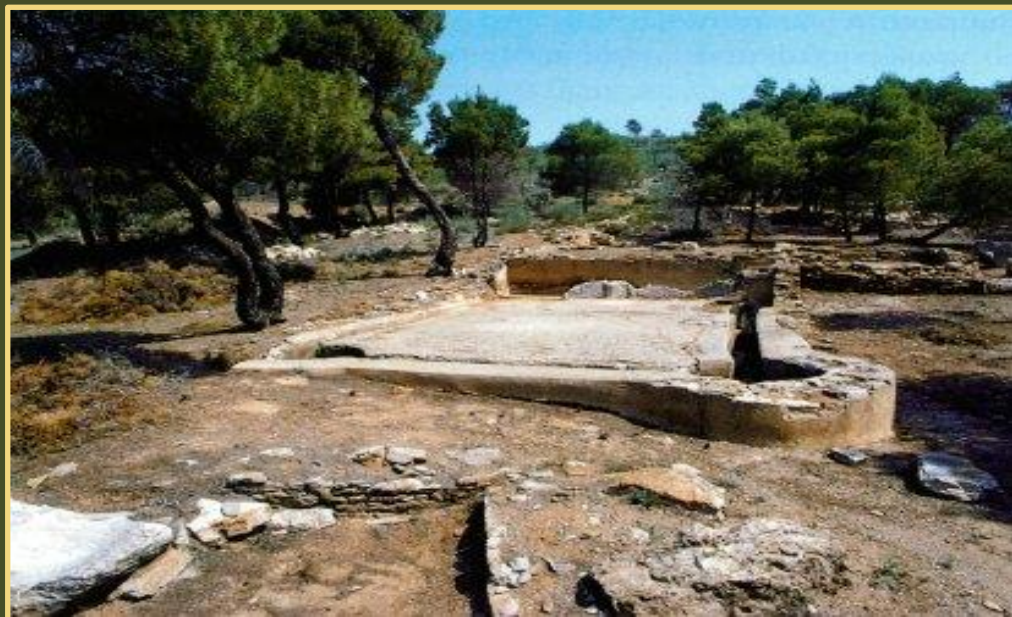


мраморная ступа



Бак
рециркуляции

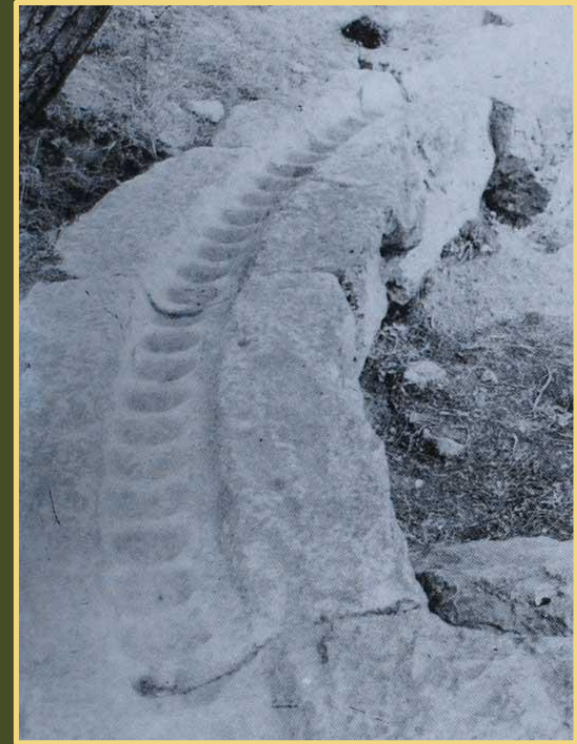
Баки, где осаждались
взвешенные твердые
частицы



На таком промприборе руда
обогащалась до содержания ок. 60%
Ag-содержащего галенита

При этом только $\frac{1}{4}$ галенита терялась

Такой промывочный прибор имел
производительность 6 тонн руды в день

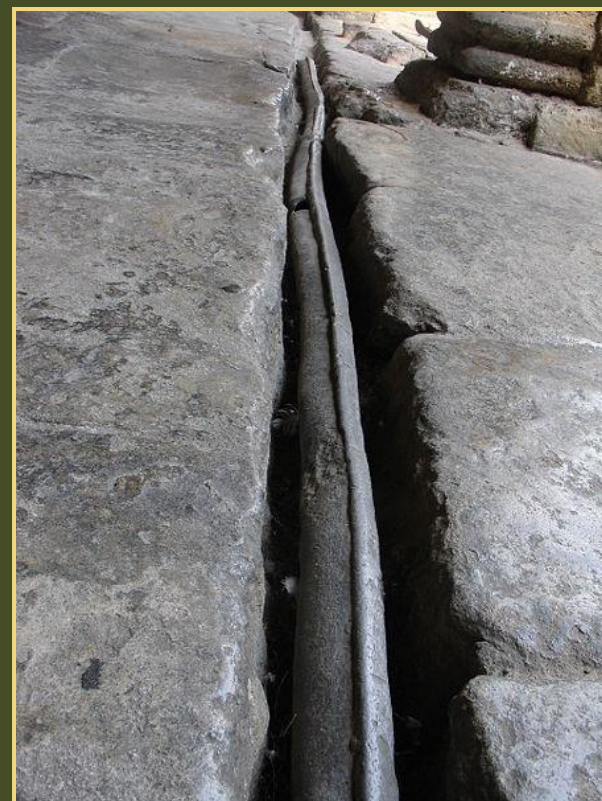


Производительность 2 тонны руды в день

Из тонны серебро-свинцовой руды получали 200 кг чистого свинца и 25 кг серебра

Свинец использовался для:

- скрепления частей колонн,
- укрепления статуй,
- водопроводных труб (поздний период)



Рудники Лавриона эксплуатировались с перерывами до 80-х годов XX века (около **5 тыс. лет** разработки!)

Лаврион уникален в минералогическом отношении. Более 400 эндогенных и гипергенных минералов, не считая новообразований в античных шлаках.



Миметит



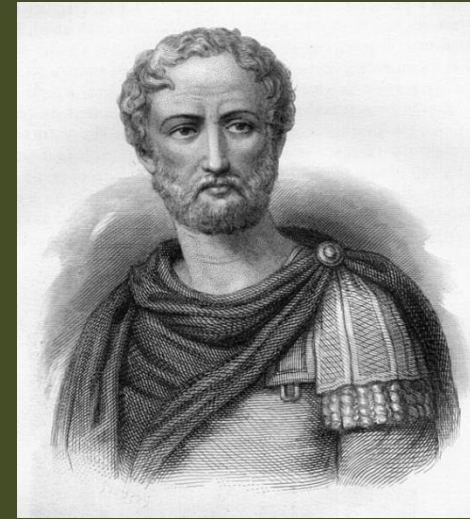
Аннабергит



Азурит

История минералогии. Предыстория

Плиний Старший (23-79 н.э.) - 37-томная (!) естественная история. Данная работа была востребована 1500-1700 лет (!)



Рассвет горного дела в античный период

- Иберы — в доримский период открытие на Пиренейском п-ве крупнейшего действующего медноколчеданного месторождения Рио-Тинто, ртутного гиганта Альмаден, крупной золотоносной провинции, оловорудных месторождений
- Золотые месторождения Франции
- Месторождения золота, цинка, свинца, ртути, меди на Балканах

Основные запасы золота на Европейском континенте были исчерпаны в Римский период!

Римские арругии — самые грандиозные горнодобывающие предприятия римлян.

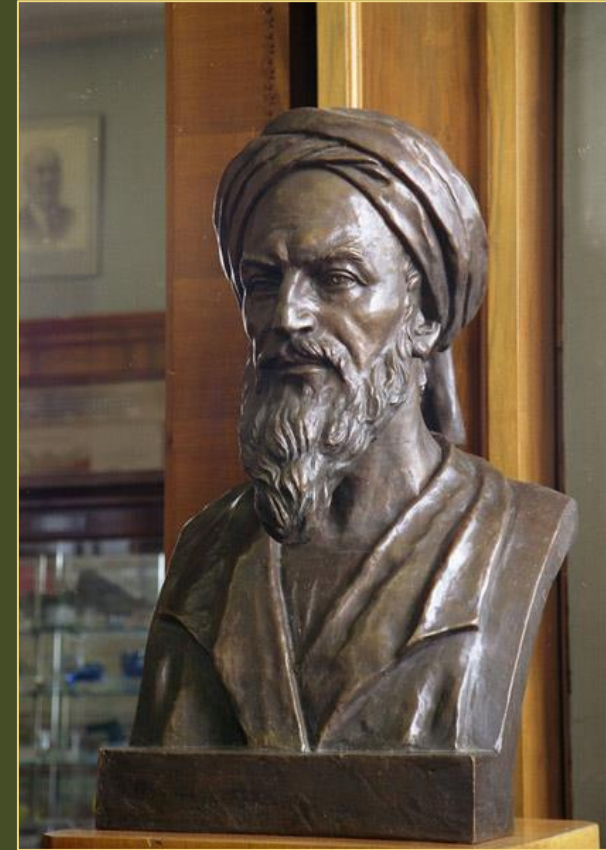
История минералогии. Предыстория

Средневековье – темные века для Европы.
Ближний и Средний Восток – расцвет науки и искусства.

Джабир ибн Хайян (ок. 721 - ок. 815) - персидский алхимик, врач, фармацевт, математик и астроном.
«*Книга семидесяти*» - своего рода энциклопедия, состоящая из 70 глав, посвященных различным вопросам; в последних главах приводятся ценные сведения о металлах и минералах. Эту книгу можно считать кратким изложением всех достижений арабов того времени в химии.

Абу Рейхан аль-Бируни (973-1048 гг.) «Минералогия или книга сводок для познания драгоценностей»
Сведения по определению, обработке и применению около 100 минералов и пород.

Абу Али Ибн Сина (Авиценна) (980-1037 гг.)
Сочинение «Природа» - классификация ископаемых объектов на камни, горючие тела, соли и металлы.



Абу Рейхан аль-Бируни

История минералогии. Предыстория

XII-XIII в — начало активной разработки в центральной Европе Ag, Cu руд, а также каменной соли. Появляются многочисленные горные школы.

*Термин «минерал» (от позднелат. *minera* — руда), впервые употребил ученый монах XIII в. **Альбертус Магнус** (Альберт Великий).*

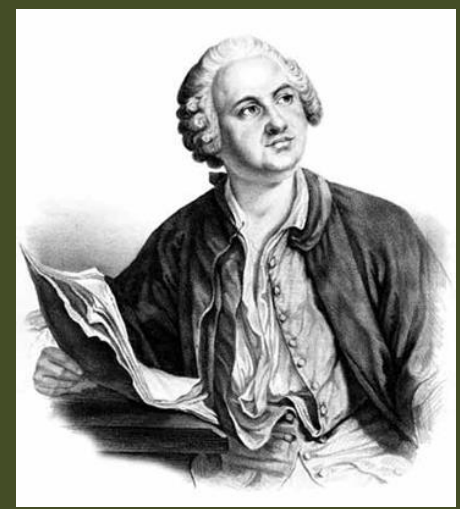
*Термин минералогия впервые употреблен в 1636 г. итальянцем **Бернардом Цезием**.*

До XVII столетия под минералами часто понимали горные породы, окаменелости, руды, а также искусственные продукты.

Труды Георга Бауэра (Агрикола) — 1494-1555 гг. Дал описание 20 новых минералов в дополнение к 60 известным. Разделял горные породы и минералы. Классифицировал минералы, основываясь на их морфологии и физических свойствах (классификация была актуальна до сер. XVIII в.). Начало учения о рудных месторождениях. Трактат «О горном деле и металлургии» был актуален более 200 лет.

История минералогии. Предыстория

М.В. Ломоносов (1711-1765)

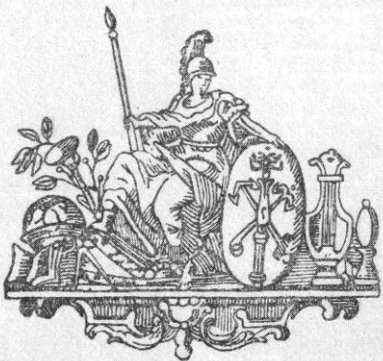


Получил геологическое образование в Германии (Марбург, Фрайберг) Из 120 научных трудов 20 посвящены геологии. «Первое основание металлургии и рудных дел» «Слово о рождении металлов от трясения Земли» «О слоях земных» «О рождении и природе селитры» - изложил свои взгляды на строение кристаллов

В работах описаны минералогические признаки оруденения, физические свойства минералов, морфология кристаллов объясняется их корпускулярным строением. Связывал образование минералов и жил с «соками земли», а их происхождение — с землетрясениями.

С именем М.В. Ломоносова связано начало развития минералогии в России.

первая основанія
МЕТАЛЛУРГИИ,
или
РУДНЫХЪ ДѢЛЪ.



ВЪ САНКТ ПЕТЕРБУРГѢ
печатаны при Императорской Академіи
Наукъ 1763 года.

Минералогия как самостоятельная научная дисциплина

К концу XVIII века минералогия сформировалась как самостоятельная научная дисциплина.

А.Г. Вернер (1750-1817) считается создателем немецкой геологической школы. Слава А.Г. Вернера превратила скромную горную школу во Фрайберге в центр европейского геологического образования.

На основании внешних признаков дал новую классификацию минералов (более 300). До этого использовали классификацию Агриколы.

Рассматривал все минералы и горные пород (за исключением молодых вулканитов) как продукт кристаллизации из водной среды.

Основоположник нептунистических взглядов в геологии.

По предложению А.Г. Вернера из минералогии выделились геология и палеонтология.

Минералогия как самостоятельная научная дисциплина

В.М. Севергин (1765-1826)

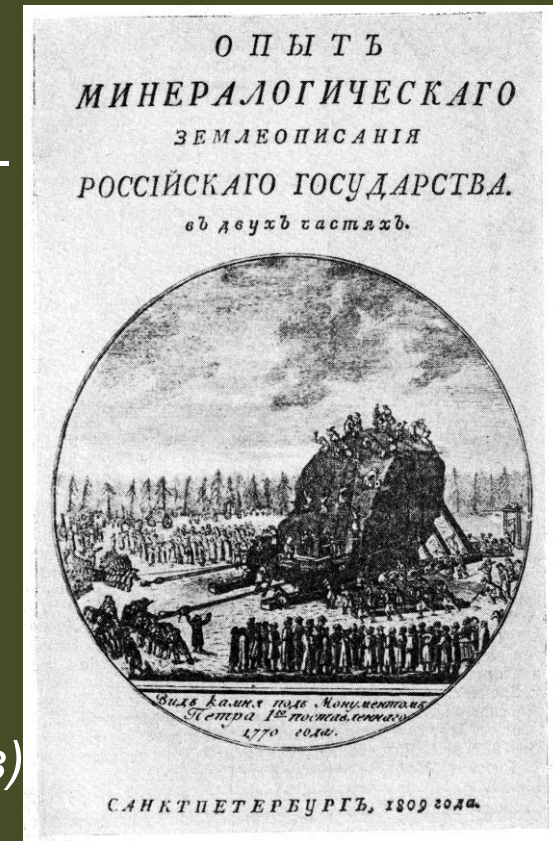
Академик, соучредитель Минералогического общества (Санкт-Петербург, 1817), которое является старейшим из ныне существующих минералогических обществ мира.

По В.М. Севергину минералогия включает в себя описательную минералогию, минеральную химию, минералогическое землеописание, экономическую минералогию, науку о горах и историческую минералогию.

Работал над очищением минералогической терминологии, *ввел понятие смежности (парагенезисов) минералов.*

Его работы имели не только научную, но и отчетливую практическую направленность.

Работы А.Г. Вернера и В.М. Севергина легли в основу основных направлений развития минералогии в XIX веке.



Минералогия в XIX веке

Химическое направление

В XIX веке значительное влияние на минералогию оказала химия. Крупнейшие химики того времени являлись одновременно и ведущими минералогами.

Окончательно формируется представление о минералах как о химических соединениях. Был определен состав порядка 450 минералов.

С 1770-х по 1830-е годы открыты почти все элементы и почти все в минералах.

И.Я. Берцелиус (1779-1848) рассматривал минералогию как химию неорганических соединений Земли.

И.Я. Берцелиус дал первую **химическую** классификацию минералов. Были выделены классы окислов, силикатов, сульфатов, карбонатов и т.д.

Дж.Дэна (1813-1895) «Система минералогии», изданная в шести выпусках с 1837 по 1892 гг. Классификация минералов Дэна без существенных изменений существует до сих пор!

Минералогия в XIX веке



Исследование физических свойств минералов:

плотности – А. Брейтгаупт

твердости – Ф. Моос

оптических свойств - Г. Сорби, Г. Розенбуш, А.А. Иностранцев, А.П. Карпинский

1850 г - английский геолог Г. Сорби предложил методику изготовления прозрачных шлифов и изучения их с помощью поляризационного микроскопа. Середина XIX века – прорыв в исследовании минералов и горных пород.

В 1891 г. Е.С. Федоров изобрел прибор, представляющий собой комбинацию двух теодолитов, который в последствие получил название «федоровский столик».

Отделение петрографии.

Минералогия в XIX веке

Кристаллографическое направление

С изобретение в 1809 г. Волластоном однокружного гониометра начались планомерные измерения кристаллов. Классические работы по кристаллографии Н.И. Кокшарова, В. Гольдшмидта, П. Грота (морфология кристаллов, атласы простых форм).

Работы о дискретном строении кристаллов О. Бравэ, Е.С. Федорова, А. Шенфлиса. В дорентгеновский период (!) выведены главные законы симметрии пространственного распределения частиц в кристаллических решетках минералов (230 пространственных групп симметрии - 230 геометрических законов, которым должно подчиняться расположение частиц в кристаллических структурах).

Минералогия в XIX веке

Экспериментальное направление (синтез кристаллов, изучение их свойств, моделирование природных процессов)

К концу XIX века было описано 700 синтезированных фаз.

Эйльгард Митчерлих – при проведении экспериментов по синтезу кристаллов были открыты явления изоморфизма и полиморфизма
Опыты Я.Вант-Гоффа по кристаллизации солей из водных растворов – понимание процессов солеобразования.

В 1837 г. французскому химику Марку Годэну путем совместного плавления алюмокалиевых квасцов и хромата калия удалось вырастить несколько небольших кристаллов рубина.

В 1891 г. французский химик О.Вернейль успешно синтезировал корунд. Позднее, его методом впервые начался промышленный синтез кристаллов.

Возникновение в начале XX в. геммологии.



Кристалл корунда,
выращенный
методом Вернейля.

Минералогия в Московском Университете

Императрица Елизавета Петровна **25 Января 1755** г. (в день Святой Татьяны) подписывает Указ об учреждении Московского университета. Университет должен был состоять из трех факультетов. Элементы минералогии в рамках общих курсов («Натуральная история», «Натуральная история и земледелие», «Химия общая, частная и минералогия») преподавались на медицинском и философском факультетах.

Осенью 1804 г. был принят новый устав Императорского Московского Университета. В соответствии с ним вместо трех факультетов учреждено четыре отделения: отделение нравственных и политических наук, отделение физических и математических наук (в том числе **кафедра минералогии и сельского домоводства**), отделение врачебных и медицинских наук (в том числе кафедра натуральной (естественной) истории) и отделение словесных наук.

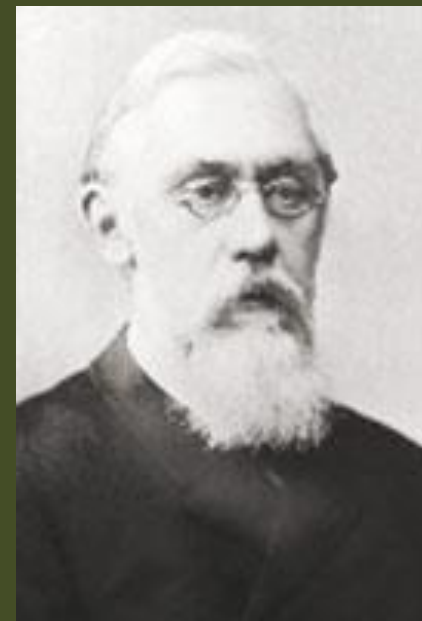
Минералогия в Московском Университете

В ходе реформ правительства Александра II **1863** год утвержден новый университетский устав.

Университет стал состоять из четырех факультетов, объединявших 53 кафедры.

Кафедра минералогии вошла в состав физико-математического факультета.

7 марта 1870 г. М.А. Толстопятов занял вакантную должность заведующего кафедрой минералогии.



*М.А.Толстопятов
(1836-1890) –
российский
минералог*

Минералогия в Московском Университете

В 1890 г. после кончины М.А. Толстопятова для заведования кафедрой минералогии приглашен **В.И. Вернадский** – выпускник Петербургского университета (1885). Он возглавлял кафедру с 1892 по 1911 г.

С приходом на кафедру В.И. Вернадского начинается период расцвета минералогии и кристаллографии в Московском университете, создания московской минералогической школы. В.И. Вернадский является одним из основоположников современной геохимии, космохимии, гидрохимии, радиохимии, радиогеологии, биогеохимии. Все эти направления развивались его многочисленными учениками, среди которых ученые с мировым именем: А.Е. Ферсман, Н.А. Смольянинов, С.П. Попов, П.П. Пилипенко, Б.Л. Личков и др.

Минералогия первой половины XX века

Классические работы В.И. Вернадского (1863-1945), А.Е. Ферсмана (1883-1945) и В.М. Гольдшмидта (1888-1947) заложили основы современной минералогии.

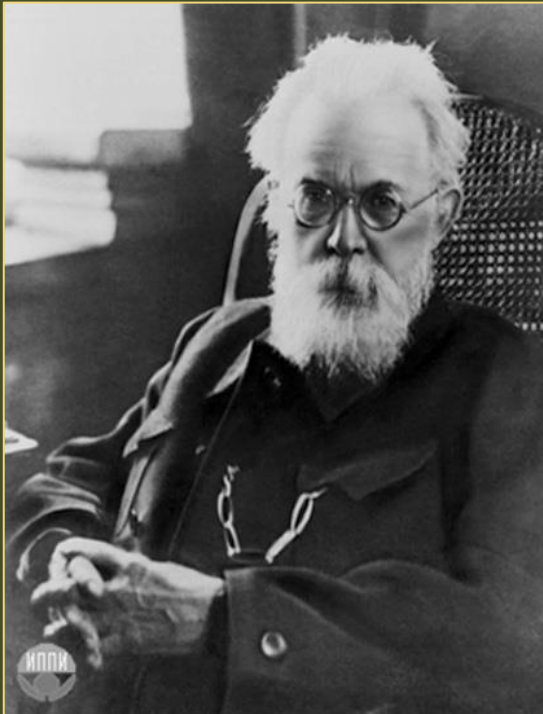
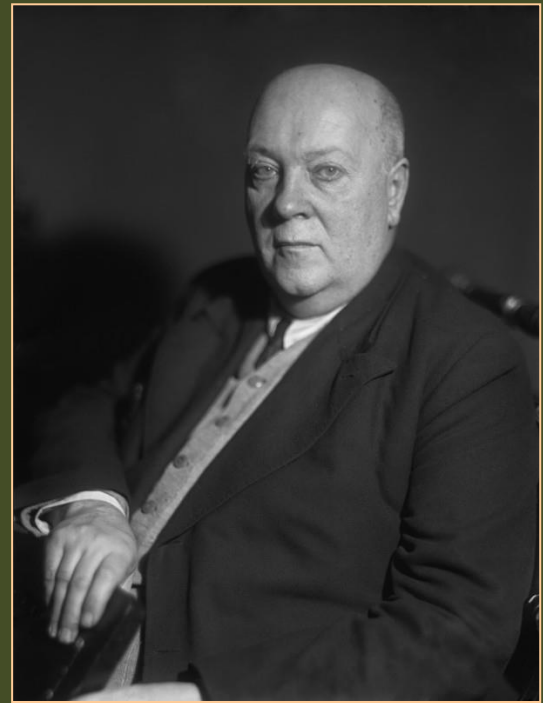
В.И. Вернадский – генетическая минералогия, кристаллохимия (развитие учения об изоморфизме,

кристаллохимия сили-

катов и алюмосиликатов). Рассматривал минералогию как химию земной коры.

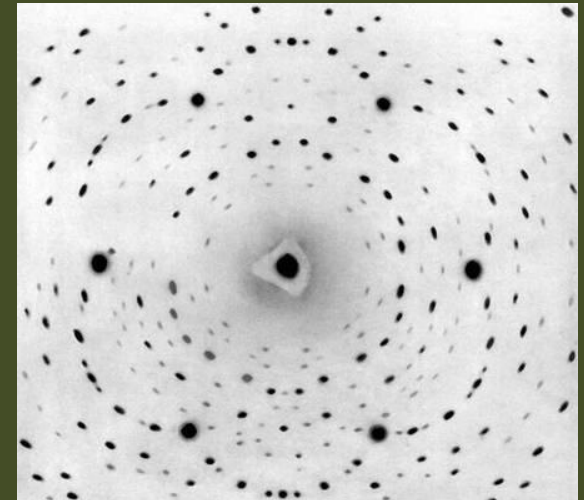
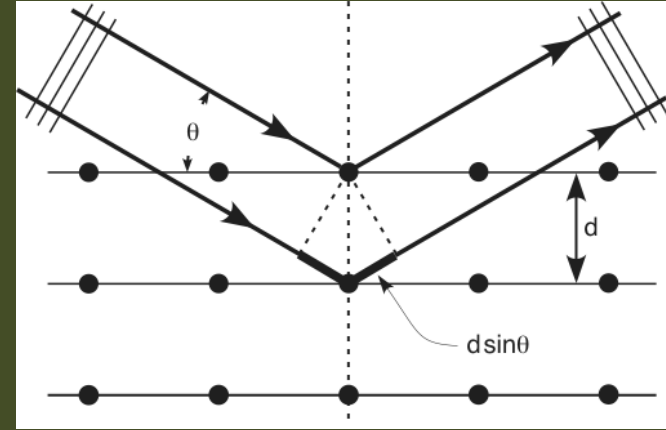
А.Е. Ферсман - учение о типоморфизме минералов, углубил учение о изоморфизме, дал одну из первых теорий окраски минералов, работы по минералогии пегматитов, региональные исследования.

Геохимия – самостоятельное направление.



Минералогия первой половины XX века

- 1895 г. – открытие рентгеновского излучения (X-RAY).
- 1912 г. - открытие Лауэ явления дифракции X-RAY на кристаллах. Лауэ подтвердил представления о решетчатом строении кристаллов. Эти работы явились основополагающими для развития рентгеноструктурного анализа.
- «Это одно из величайших открытий точных наук быстро сдвигает минералогию на новый путь и открывает перед ней негаданные огромные перспективы» (Вернадский В.И., 1928).
- Работы Брэггов, В.Г.Вульфа, Л.Полинга, В.Гольдшмидта и др.
- Возникновение кристаллохимии.



Минералогия второй половины XX века

Революционный скачок в развитии методов исследования вещества (рентгеноструктурный анализ, электронно-зондовые методы, спектроскопические методы, изотопные исследования и т.д.)



Развитие таких направлений как онтогения, генетическая минералогия, физика минералов, минералогия мантии, дна океана, космическая минералогия. Открытие и изучении новых минералов.

Современная минералогия – то звено, через которое связаны геологические дисциплины (геохимия, петрология, литология, учение о полезных ископаемых) с фундаментальными науками о неживом веществе – физикой (в первую очередь физикой твердого тела) и неорганической химией.

Основные направления в современной минералогии:

- Кристаллохимия минералов
- Генетическая минералогия (включая онтогению)
- Экспериментальная минералогия
- Физика минералов
- Региональная минералогия
- Минералогия космических тел
- Прикладная минералогия (поисковая, технологическая, минералогическое материаловедение)
- Биоминералогия
- Наноминералогия

Определение понятий «минерал» и «минеральный вид»

МИНЕРАЛ – базовое понятие минералогии, но, как ни удивительно, четкого и однозначного его определения не существует, разные авторы понимают этот термин несколько по-разному.

Кроме того, в большинстве приводимых в литературе определений присутствуют некоторые неопределенности и допущения, как раз и оставляющие место, с одной стороны, для разногласий, а с другой – для интуитивного понимания.

"Дать вполне полное определение этому понятию (минерала) мы не можем, как не можем такового и для других объектов природы" (Вернадский, 1925).

Определение понятий «минерал» и «минеральный вид»

Если опираться на критерии, которые приняты сегодня Международной минералогической ассоциацией при выделении новых минеральных видов, то определение понятие МИНЕРАЛ будет следующим:

Минерал – твердое кристаллическое вещество определенного химического состава с определенными кристаллографическими (структурными) характеристиками, возникшее в природе в результате геологических процессов на Земле или внеземных объектах.

Исключений из этого определения в минералогии очень мало, и практически все они – дань истории (жидкие (самородная ртуть, амальгамы), аморфные (опал, аллофан и др.) и метамиктные фазы).

Спорные объекты – органические минералы, техногенные минералы, вещество комет и планет-гигантов и т.д.

Минерал и минеральный вид

МИНЕРАЛЬНЫЙ ВИД – основной таксон в минералогической номенклатуре.

- Минералы существуют в виде индивидов.

Минерал (минеральный индивид) – конкретный природный объект

- Минеральным видом называют совокупность природных химических соединений, характеризующихся определенными составом (и пределами его вариаций) и кристаллической структурой.

Минеральный вид – условное понятие

Когда мы в своей повседневной практике пользуемся словом МИНЕРАЛ, то подразумеваем в подавляющем большинстве случаев именно МИНЕРАЛЬНЫЙ ВИД.

Выделение новых минеральных видов

Минерал – твердое кристаллическое вещество определенного химического состава с определенными кристаллографическими (структурными) характеристиками, возникшее в природе в результате геологических процессов.

Три ключевых момента в совокупности определяют МИНЕРАЛЬНЫЙ ВИД:

- 1) природное, т.е. не антропогенное (техногенное) происхождение;*
- 2) принадлежность к определенному структурному типу;*
- 3) определенный химический состав.*

Новый минерал выделяется в том случае, если хотя бы по одной из характеристик (2) и (3) обнаруженное в природе кристаллическое вещество не может быть отождествлено ни с каким из уже известных минеральных видов.

Выделение новых минеральных видов

Если новый минерал – представитель уже известного структурного типа, то главным критерием его новизны является преимущественное занятие хотя бы одной кристаллографически независимой позиции в структуре иным химическим элементом, чем в уже известных минералах.

Элемент, преобладающий в структурной позиции, называется **ВИДООБРАЗУЮЩИМ**.

В качестве видообразующего компонента может выступать и *вакансия*: изоструктурные кристаллы с заполненной и пустой позицией будут относиться к разным минералам.

Таким образом, разнообразие минералов задается разнообразием структурных типов природных веществ и возможными комбинациями химических элементов в их рамках.

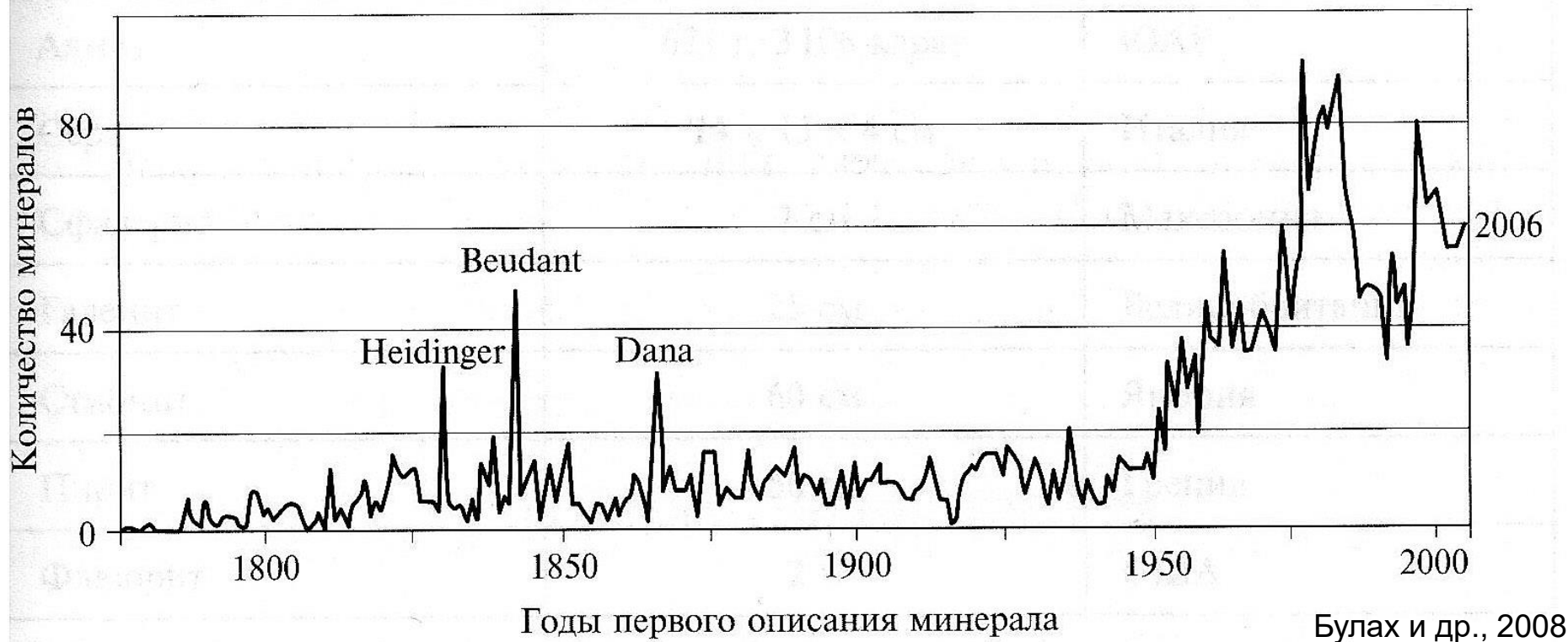
Открытие новых минералов

На сегодняшний день (2016 г) известно более 5100 минеральных видов.

- В последнее время открывается 70-100 новых видов ежегодно (в 2013 была рассмотрена 141 заявка на новые мин. виды).
- Рекордсмены: И.В. Пеков (*первый автор около 110 новых минералов (2016) – абсолютный рекорд за всю историю изучения минералов*), Н.В. Чуканов, А.П. Хомяков, П.Данн (США),
- Новые минералы, как правило, весьма мелкие и экзотические фазы. Редко это породообразующие минералы (чароит).



Статистика открытия новых минералов по годам



Пики — публикации сводок минеральных видов, ревизия групп минералов. Всплеск в открытии новых минералов в середине XX века — развитие методов исследования вещества

Открытие новых минералов

Одновременно с пополнением каталога минералов идет дискредитация видов, (пересмотр классификаций, выявление ошибок и т.д.).

Так, апофиллит за 70-летний период 1784-1853 гг. "открыли" десятикратно! И каждый раз он получал новое название, которое потом приходилось исключать из минералогической номенклатуры.

Нередко дискредитированные минералы восстанавливают «в правах», но уже с новым названием:

дашкесанит – хлоркалийгастингсит
барсановит - георгбарсановит



Друза кристаллов
апофиллита, Индия

Дискуссия о количестве минеральных видов

Известное количество биологических видов по разным оценкам колеблется от первых млн. до десятков млн., количество неорганических химических соединений – более 100 тыс., органических – видимо, более 20 млн.

На этом фоне число известных минералов невелико!

Ферсман А.Е. О числе минеральных видов (ДАН СССР, 1938, Т.19, №4)
Урусов В.С. Почему их только две тысячи? (Природа, 1983, № 10)
«Естественный отбор» минеральных видов (ЗВМО, 2010, №1).

А.Е.Ферсман писал, что «природа выбирает лишь простейшие пути и простейшие соединения. Законы кристаллохимии и термодинамики нам показывают, что далеко не все сочетания хим.элементов геохимически и энергетически возможны».

По Урусову В.С., формирование минералов как набора элементов ограничивается геологическими, геохимическими, кристаллохимическими и рядом других факторов.

По-видимому, следует ожидать, что в исторической перспективе процесс открытия новых минеральных видов замедлится и из лавинообразного перейдет в режим асимптотического приближения к некоторому предельному уровню.

Дискуссия о количестве минеральных видов

Хомяков А.П. Почему их больше чем две тысячи? (Природа, 1996, №5, с.62-74)

А.П. Хомяков – прогнозировал существенное увеличение количества минералов. Причина – пристальное внимание исследователей не к рядовым, а минералогически уникальным объектам, сформировавшимся в аномальных геологических и геохимических обстановках.

Подчеркивалась роль «структурного фактора» в разнообразии минералов.

А.П. Хомяковым была выдвинута гипотеза об отсутствии естественного предела числа минералов.



Хибинский и Ловозерский массивы – одни из самых крупных в мире щелочных комплексов, одни из самых знаменитых минералогических объектов мира с рекордным количеством находок новых и редких минералов.

Хибины – более 550 минералов, из них более 120 новых; Ловозеро – около 400 минералов, из них более 110 новых.

Дискуссия о количестве минеральных видов

Фумаролы Толбачика (2-ой конус БТТИ).

Установлено около 230 минералов, связанных с фумарольной деятельностью. На участке 50x50 м открыто более 80 новых (2016 г.) мин.видов (преимущественно, арсенаты, ванадаты, сульфаты)!

Процессы минералообразования очень нестационарны. Учитывая широкую вариативность структур минералов и узкие поля их устойчивости, незначительное изменение условий приводит к формированию новых фаз (в образце площадью 1 см² может быть до 7 различных арсенатов!).



Зеленые игольчатые кристаллы пийпита
<http://webmineral.ru/>

Дискуссия о количестве минеральных видов

Уникальная гипергенная минерализация Чили

Пустыня Атакама – жаркий климат, почти нулевая влажность и близость океана – богатейшая гипергенная минерализация.

Уникальный в минералогическом и геохимико-генетическом отношении объект, не имеющий в мире аналогов, Пабельон де Пика – минерализация возникла в результате реакций между органическим веществом (гуано), галитом и окисляющимися сульфидами (халькопирит). Таким образом, в процесс вовлекаются Cu^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+ , NH_3^0 , Cl^- , NO_3^- , органические вещества и др.



Чуканов Н.В., Зубкова Н.В., Мён Г., Пеков И.В., Пущаровский Д.Ю., Задов А.Е.
Чанабаяит $\text{Cu}_2(\text{N}_3\text{C}_2\text{H}_2)_2\text{Cl}[(\text{NH}_3), \text{Cl}, \text{H}_2\text{O}, \square)_4$ – новый минерал, содержащий триазолятный анион // Записки РМО, 2015, 2, 36-47.

Названия новых минералов

Нет строгой номенклатуры

- *Названия в честь известных людей*
- *Названия в честь известных организаций*
- *По географическим объектам*
- *По химическому составу или свойствам*

Названия новых минералов

В Гренландии был найден крупный метеорит, один из фрагментов которого массой примерно в 20 тонн был привезен в Данию и установлен перед входом в Геологический музей Копенгагенского университета.



<http://www.newscientist.com>, Nature Geoscience 8, 97–101 (2015)

В 70-х годах XX века в этом метеорите был обнаружен минерал с составом **CrN**. В честь фонда, учрежденного датской пивоваренной компанией Карлсберг, оказавшего помощь в изучении минералогии этого метеорита, минерал впоследствии получил название — карлсбергит.

Номенклатура минералов группы амфиболов



Минералы из разных подгрупп (Na амфиболы, Na-Ca амфиболы и т.д.) имеют разные корневые имена (root name).

В рамках одной подгруппы новое корневое имя используется в случае изменения общего заряда в позициях А и/или С

Ионы Na^+ , Mg^{2+} , Al^{3+} , Si^{4+} и OH^- в соответствующих позициях структуры определяют «корневой» состав, т.е. не требуют использования приставок.

Если хотя бы в одной из позиций структуры преобладает другой изовалентный ион, то в названии минерала используются приставки, отражающие состав

Приставки:

Prefix	Meaning (apfu)	Not applicable to
Chloro	$Cl > OH, F$	Oxo-amphiboles
Chromio	${}^cCr > {}^cAl, {}^cFe^{3+}, {}^cMn^{3+}$	Amphiboles which do not contain trivalent cations in their root formulae*
Ferri †	${}^cFe^{3+} > {}^cAl, {}^cCr, {}^cMn^{3+}$	Amphiboles which do not contain trivalent cations in their root formulae*, plus riebeckite, arfvedsonite, hastingsite
Ferro	${}^cFe^{2+} > {}^cMg, {}^cMn^{2+}$	Any amphibole whose ferro-end-member has a trivial name: tremolite, cummingtonite, grunerite, hastingsite, riebeckite, arfvedsonite, rootname 16
Fluoro	$F > OH, Cl$	Oxo-amphiboles
Magnesio	${}^cMg > {}^cFe^{2+}, {}^cMn^{2+}$	All amphiboles except riebeckite, arfvedsonite, hastingsite, hornblende
Mangano	${}^cMn^{2+} > {}^cMg, {}^cFe^{2+}$	
Mangani	${}^cMn^{3+} > {}^cAl, {}^cCr, {}^cFe^{3+}$	Amphiboles that do not contain trivalent cations in their root formulae*
Oxo	${}^wO^{2-} > OH + F + Cl$	Oxo-amphiboles where $Ti = 1$ apfu in the root formula‡, plus ungarettiite
Potassic	${}^AK > {}^ANa, {}^ACa, {}^A\Box$	Amphiboles that do not contain A-site cations in their root formulae§
Zinco	${}^cZn > {}^cMg, {}^cFe^{2+}$	

Номенклатура минералов группы амфиболов

$\text{Na}(\text{NaCa})(\text{Mg}_3\text{Al}_2)[\text{Si}_6\text{Al}_2\text{O}_{22}](\text{OH})_2$	тарамит (Na-Ca амфибол)
$\text{Na}(\text{NaCa})(\text{Fe}^{2+}_3\text{Al}_2)[\text{Si}_6\text{Al}_2\text{O}_{22}](\text{OH})_2$	ферротарамит
$\text{Na}(\text{NaCa})(\text{Mg}_3\text{Fe}^{3+}_2)[\text{Si}_6\text{Al}_2\text{O}_{22}](\text{OH})_2$	ферритарамит
$\text{K}(\text{NaCa})(\text{Mg}_3\text{Al}_2)[\text{Si}_6\text{Al}_2\text{O}_{22}](\text{OH})_2$	калийтарамит
$\text{Na}(\text{NaCa})(\text{Mg}_3\text{Al}_2)[\text{Si}_6\text{Al}_2\text{O}_{22}]\text{F}_2$	фтортарамит
$\text{Na}(\text{NaCa})(\text{Fe}^{2+}_3\text{Fe}^{3+}_2)[\text{Si}_6\text{Al}_2\text{O}_{22}]\text{F}_2$	ферроферрифтортарамит
$\text{K}(\text{NaCa})(\text{Fe}^{2+}_3\text{Al}_2)[\text{Si}_6\text{Al}_2\text{O}_{22}]\text{F}_2$	калийферрофтортарамит
$\text{K}(\text{NaCa})(\text{Mg}_3\text{Fe}^{3+}_2)[\text{Si}_6\text{Al}_2\text{O}_{22}]\text{F}_2$	калийферрифтортарамит
$\text{K}(\text{NaCa})(\text{Fe}^{2+}_3\text{Fe}^{3+}_2)[\text{Si}_6\text{Al}_2\text{O}_{22}]\text{Cl}_2$	калийферроферрихлортарамит

Названия редкоземельных минералов

REE в подавляющем большинстве случаев входят в состав минералов не по отдельности, а совместно, что является важнейшей особенностью геохимии данной группы элементов.

На этом, в частности, основана современная номенклатура минералов REE, впервые предложенная А.Левинсоном в 1966 г. и затем модифицированная П.Бейлиссом и А.Левинсоном в 1988 г.

Редкоземельным считается такой минерал, у которого хотя бы в одной структурной позиции сумма *REE* преобладает над каждым из других компонентов (правило Левинсона).

Элемент, преобладающий среди этих *REE*, считается для данного минерала видообразующим, и его химический символ записывается через дефис в скобках после названия минерала (суффикс-уточнитель Левинсона): например, монацит-(Ce) (произносится «монацит-церий»). При этом название «монацит» (без суффикса-уточнителя) повышается в иерархическом ранге от минерального вида до серии.

Границы минеральных видов

Минерал – твердое кристаллическое вещество **определенного химического состава** с определенными кристаллографическими (структурными) характеристиками, возникшее в природе в результате геологических процессов.

SiO_2 (триг.) – кварц
 $(\text{Mg,Fe})_2[\text{SiO}_4]$ – ?

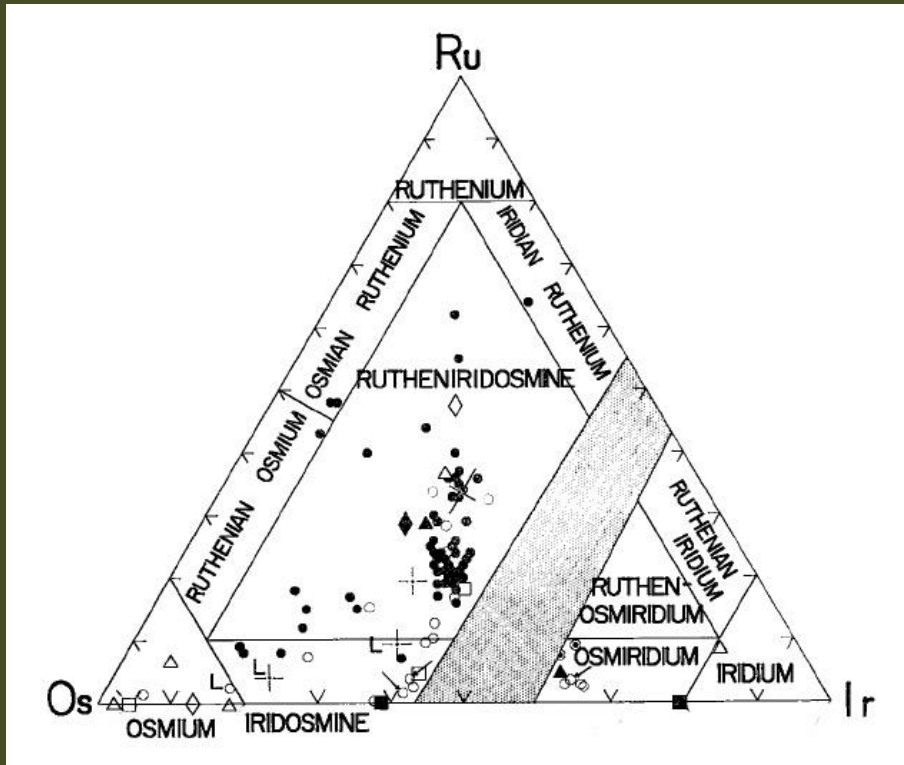
Вопрос проведения границы между изоструктурными видами в сериях твердых растворов, в т.ч. непрерывных, в настоящее время решен формально:

самостоятельные названия приписываются конечным членам серий твердых растворов, отождествляемых с минеральными видами, а видообразующим для структурной позиции считается преобладающий в ней химический элемент.

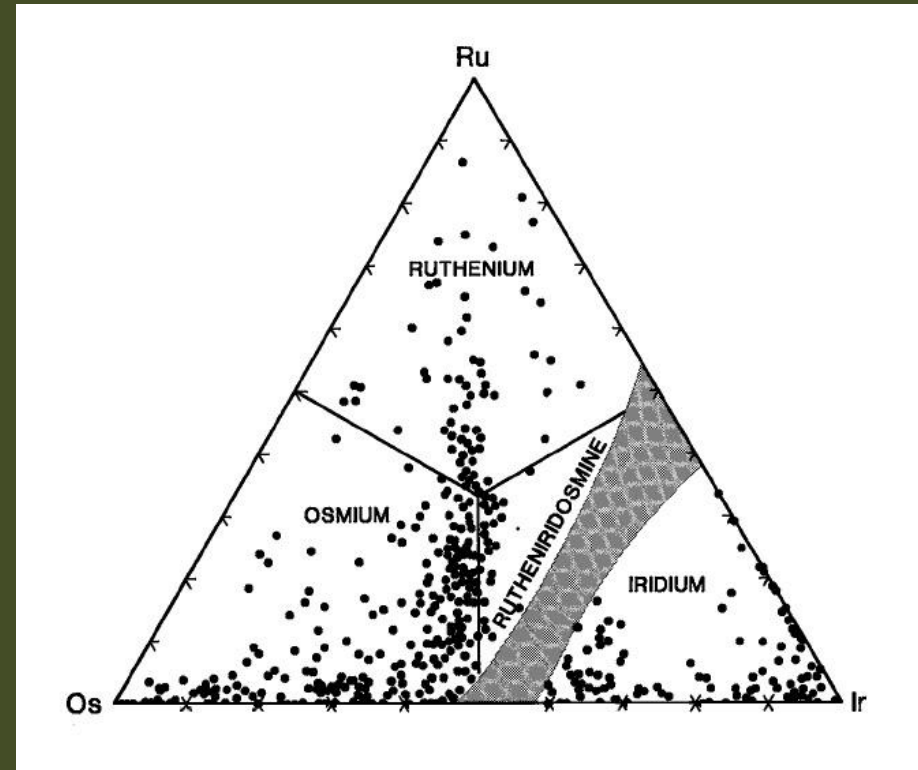
В двухкомпонентных системах этот принцип носит название “правило 50%”.

Границы минеральных видов

Применение «правила 50%» к простым системам приводит к уменьшению количества наименований, к сложным – к увеличению



Фазовая диаграмма Ru-Ir-Os по Д.Харрису и Л.Кабри, 1973.



Фазовая диаграмма Ru-Ir-Os по Д.Харрису и Л.Кабри, 1991.

Классификация минералов

Основы современных классификаций минералов заложены в XIX в (Берцелиус, 1814; Дэна 1850-1854).

Современные классификации используют кристаллохимический подход, учитывающий важнейшие признаки минеральных видов – химический состав и кристаллическую структуру.

Классификация минералов – сложный и неоднозначно решаемый вопрос.

Нет идеальной классификации

Современная систематика минералов

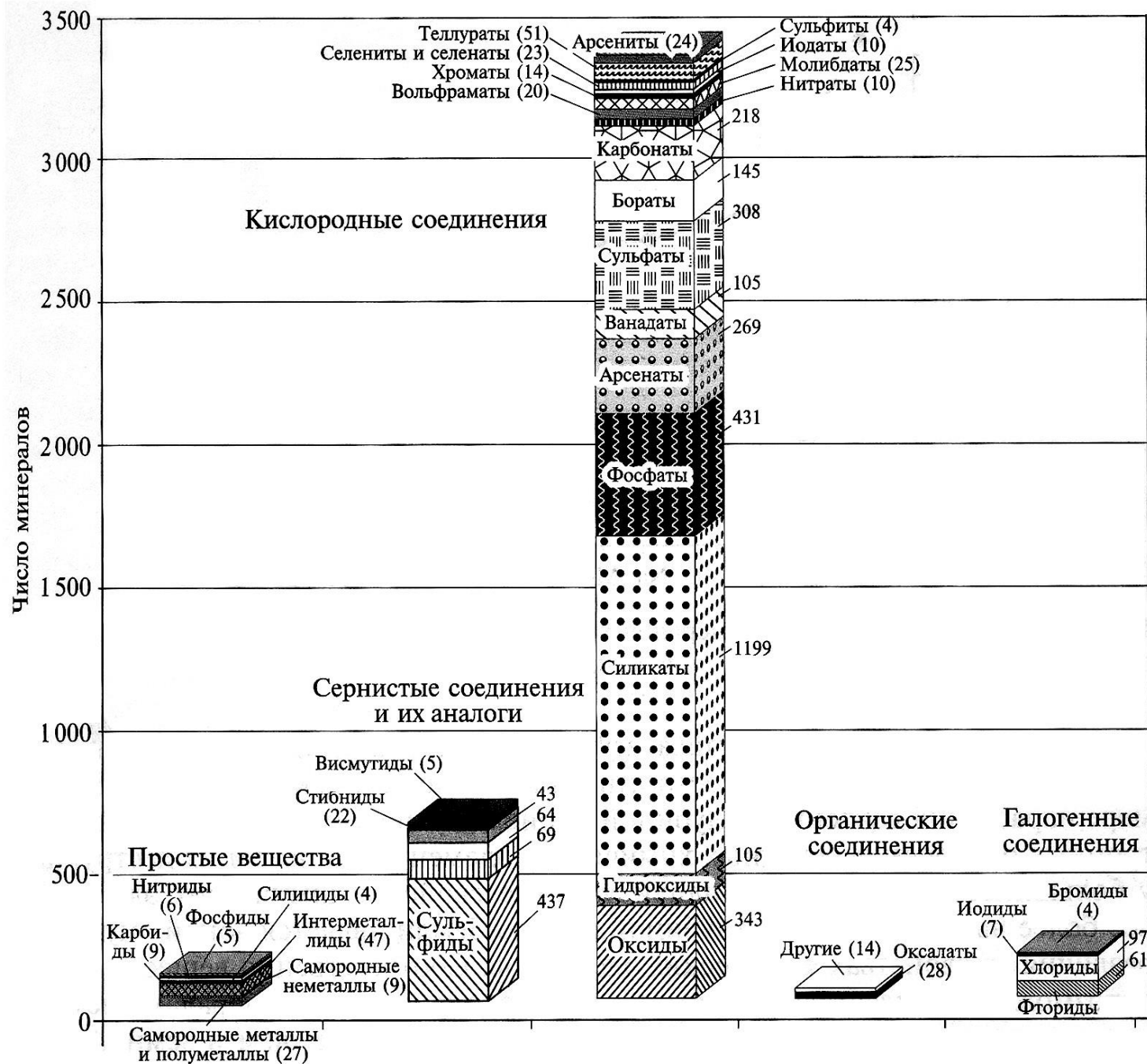
Для единообразия систематики и последующей классификации минералов IMA приняла следующую иерархическую схему (Mills et al., 2009):

1. Класс
2. Подкласс
3. Семейство
4. Надгруппа
5. Группа
6. Подгруппа или ряд
7. **Минеральный вид**
8. Минеральная разновидность

КЛАССЫ МИНЕРАЛОВ — выделяют по основному аниону (O^{2-} , S^{2-} , Cl^- и т.д.), анионному комплексу (OH^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , PO_4^{3-} , $B_xO_y^{z-}$, $Si_xO_y^{z-}$ и т.д.) или отсутствию аниона (самородные элементы).

Современная систематика минералов

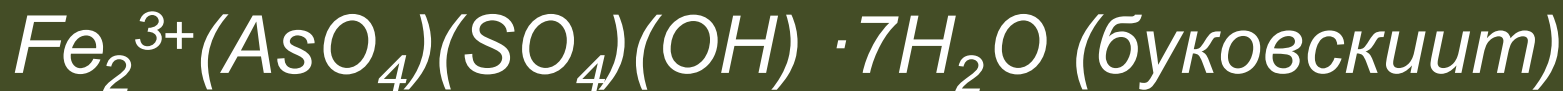
1. Простые вещества (классы – **самородные элементы и интерметаллиды**, карбиды, силициды, нитриды, фосфиды)
2. Сульфиды и их аналоги (классы - **сульфиды**, селениды, теллуриды, арсениды, стибниды, висмутиды)
3. Кислородные соединения (классы – **окислы и гидроокислы, силикаты, фосфаты, арсенаты**, ванадаты, **сульфаты, бораты, карбонаты**, нитраты, вольфраматы, молибдаты, хроматы, селенаты, теллулаты, иодаты, **сульфиты, селениты, арсениты**)
4. Галогениды (классы – **фториды, хлориды, бромиды, иодиды**)
5. Органические соединения (оксалаты и др.)



Распростра-
ненность
минералов
по классам
(Булах и др.,
2008)

Современная систематика минералов

К какому классу относится этот минерал?



Современная систематика минералов

ПОДКЛАССЫ МИНЕРАЛОВ

Уровень подклассы применяется, обычно, к классам силикаты и бораты

СЕМЕЙСТВА МИНЕРАЛОВ

Уровень семейства применяется IMA к группам и/или надгруппам, имеющим сходные уникальные структурные и/или химические свойства. Примером минерального семейства, выделяемого по структурному критерию, является **семейство цеолитов**, где все члены характеризуются каркасными структурами, содержащими полости. При этом сами минералы могут принадлежать к разным группам (и надгруппам).

НАДГРУППЫ МИНЕРАЛОВ

Надгруппа включает две или более групп, имеющих, в целом, одинаковую структуру и состоящих, как правило, из химически подобных элементов. Обычно, члены надгруппы принадлежат к одному и тому же минеральному классу; в редких случаях надгруппа может включать группы, принадлежащие к различным классам.

Надгруппа пирита

Структурный тип NaCl

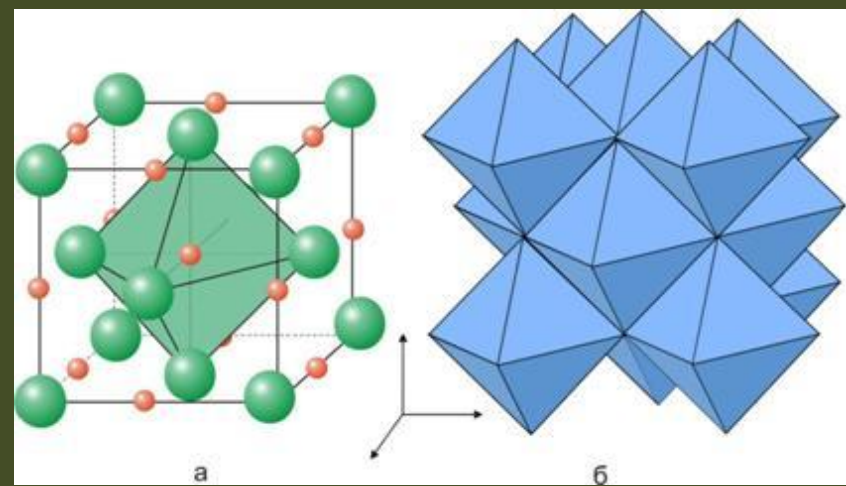
Группа пирита (куб.)

Пирит – FeS_2

Эрлихманит – OsS_2

Лаурит – RuS_2

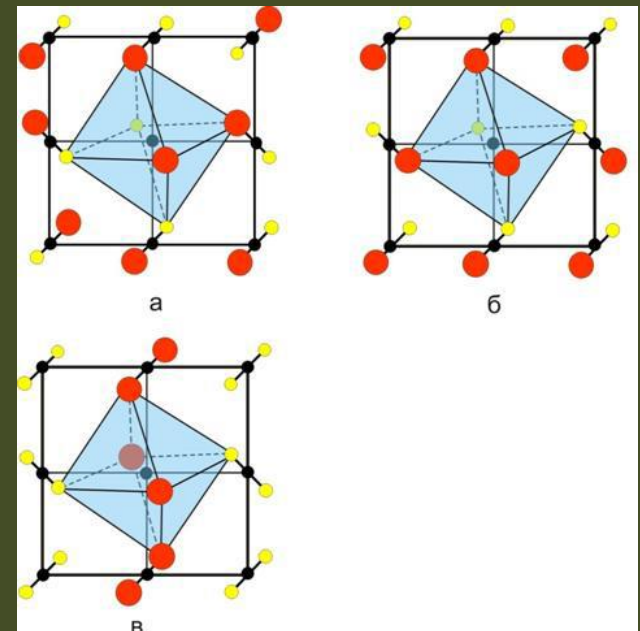
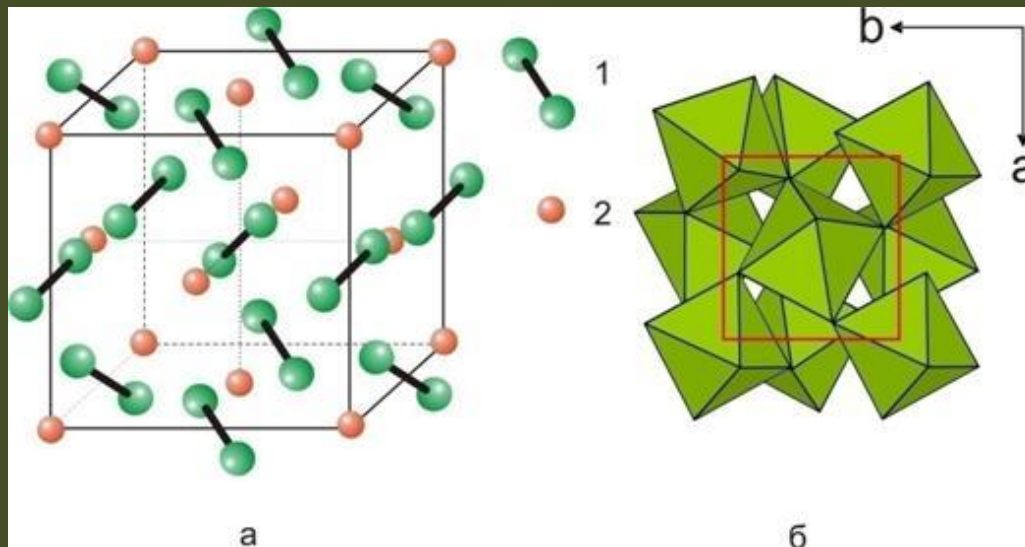
Сперрилит – PtAs_2



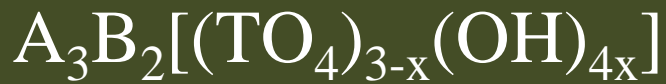
Группа кобальтина (куб, ромб.)

кобальтин CoAsS

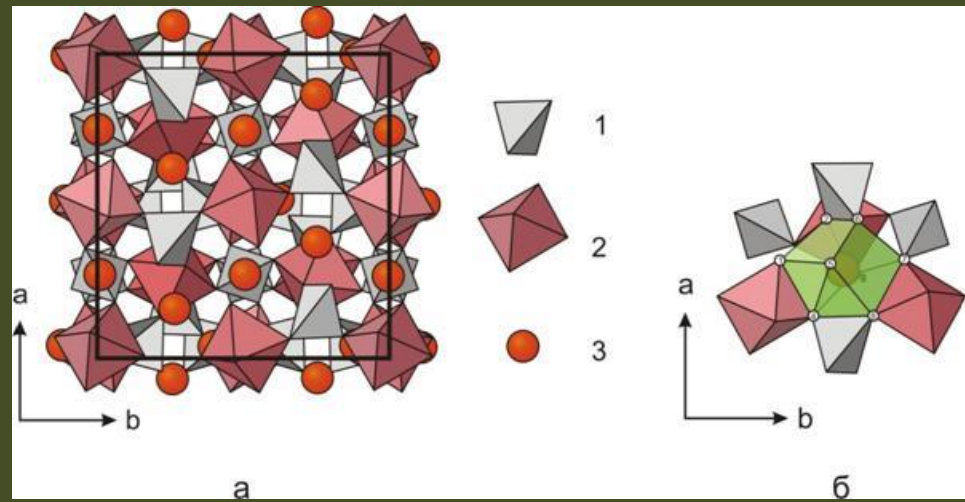
герсдорфит NiAsS



Надгруппа граната



Заряд катионов в позиции T и симметрия являются критериями для деления надгруппы граната на группы. 33 минвида разделены на 5 групп:



Кристаллическая структура гранатов (а);
координационное окружение катиона A^{2+} (б).
1 – SiO_4 ; 2 – $B^{3+}O_6$; 3 – A^{2+}

1. Группа генритермьерита (тетрагон. синг.) (*генритермьерит* $Ca_3Mn_2[(SiO_4)_2(OH)_4]$)
2. Группа битиклеита (куб. синг.) (*битиклеит* $Ca_3SbSn[AlO_4]_3$)
3. Группа шорломита (куб. синг.) (*шорломит* $Ca_3Ti^{4+}_2[(Fe^{3+}O_4)_2(SiO_4)]$, *кимцеит* $Ca_3Zr_2[(Al^{+3}O_4)_2(SiO_4)]$)
4. Группа берцелиита (куб. синг.) (*берцелиит* $NaCa_2Mg_2[AsO_4]_3$)
5. Группа граната (куб. синг.) (*пироп* $Mg_3Al_2[SiO_4]_3$)

Еще три минвида являются пока единственными представителями в своих потенциальных группах:

- Катоит $Ca_3Al_2[(SiO_4)_{0-1.5}(OH)_{6-12}]$ (куб. синг.)
Криолитионит $Na_3Al_2[LiF_4]_3$ (куб. синг.)
Яфсоанит $Ca_3Te^{6+}_2[ZnO_4]_3$ (куб. синг.)

Современная систематика минералов

ГРУППЫ МИНЕРАЛОВ

В группы принято объединять минеральные виды, родственные и по составу, и по структуре. Родства только по одному из этих признаков недостаточно.

Например, изоструктурные, но химически принципиально различные галит и галенит не объединяются в одну группу, как и полиморфные модификации, сильно различающиеся в структурном отношении (например, модификации кремнезема или TiO_2).

ПОДГРУППЫ

Группа пироксенов – подгруппы Mg-Fe, Ca, Na-Ca и щелочных пироксенов

Группа амфиболов – подгруппы Mg-Fe-Mn, Li, Ca, Na-Ca и Na амфиболы

Группа слюд – подгруппы собственно слюд, хрупких слюд и слюд с дефицитом межслоевых катионов

Современная систематика минералов

РАЗНОВИДНОСТИ выделяются у минерального вида в тех случаях, когда нужно подчеркнуть различия, не позволяющие выйти за пределы минерального вида.

Выделение разновидностей не регламентируется какими-либо правилами ни в части признака, по которому они выделяются, ни в части степени его проявления.

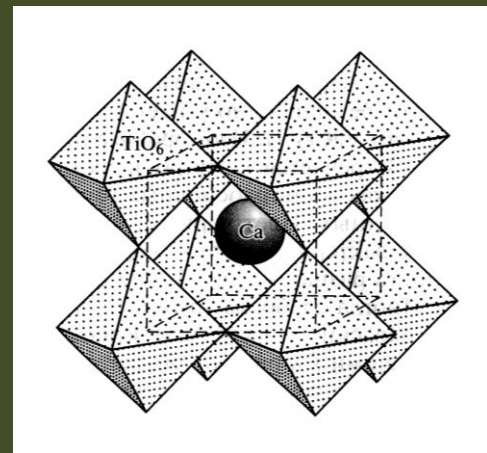
Таковыми признаками могут быть визуально определяемые характеристики — например, цвет, морфология, прозрачность. Также выделяют разновидности химические — по аномальному (повышенному, реже пониженному) содержанию какого-либо примесного компонента, обусловливающему отклонение от идеального состава.

Разновидности минералов

Иногда структурные отклонения не выходят за рамки структурного типа (расщепление позиций, вакансионные дефекты, частичная упорядоченность/разупорядоченность и пр.), и для целого ряда минералов традиционно принято выделять *структурные* разновидности, а не самостоятельные виды.

Яркий пример – *политипы у минералов со слоистыми структурами* (слюды, вюртцит, молибденит и др.).

Другой характерный случай – разновидности с различиями в симметрии, к которым приводят незначительные искажения элементарной ячейки, как при одном и том же составе (*например, перовскит, лейцит*), так и при его закономерных, но небольших изменениях (*гексагональный и моноклинный пирротин*).



Разновидности минералов



Типы химической связи

ХИМИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ в кристаллах – это взаимодействие между атомами, ионами или молекулами в кристаллической решётке в результате электрических сил притяжения. Тип и свойства химической связи определяются электроотрицательностью элементов, участвующих в ее образовании.

Важнейшие типы химической связи: металлическая, ковалентная и ионная.

При образовании этих типов химической связи атомы и ионы стремятся приобрести устойчивую электронную оболочку (содержащую 2, 8 или 18 электронов и соответствующую внешней оболочке атома ближайшего инертного газа (*завершенную оболочку*)).

В качестве особых типов следует выделить ван-дер-ваальсовы межмолекулярные взаимодействия и водородные связи в кристаллах.

Выделение типов связи весьма условно. Часто в минералах реализуются промежуточные связи, нередко в одной структуре бывает проявлено несколько типов химической связи одновременно! Типичные примеры - графит, сера, аурипигмент, соли кислородных кислот.

Типы химической связи

Металлическая связь – характерна для элементов «левой части» таблицы Менделеева, атомы которых на внешнем уровне имеют мало валентных электронов, которые из-за небольшой энергии ионизации слабо удерживаются в атоме. В кристаллических решетках металлов валентные орбитали соседних атомов перекрываются. Благодаря этому электроны относительно свободно перемещаются с одной орбитали на другую («электронный газ»), осуществляя связь между всеми атомами металла.

Для соединений с металлической связью понятие «валентность» неприменимо!

Связь ненаправленная.

Небольшое разнообразие структур (часто ПУ), т.к. они обычно образованы атомами одного радиуса. Минералы непрозрачны, электропроводны, с металлическим блеском, часто с умеренной твердостью, ковкие.

Типы химической связи

КОВАЛЕНТНАЯ СВЯЗЬ образуется путем объединения атомных орбиталей двух соседних атомов в кристаллической решетке. Два атома могут обобществлять несколько пар электронов. *Чем больше пар электронов задействовано в образовании связи, тем прочнее связаны между собой эти атомы и тем короче сама связь.*

Ковалентная связь имеет некоторое сходство с металлической, поскольку и в ее основе лежит обобществление валентных электронов. Однако электроны, которые осуществляют ковалентную связь, находятся вблизи соединенных атомов и прочно с ними связаны. Электроны же, осуществляющие металлическую связь, свободно перемещаются по всему кристаллу и принадлежат всем его атомам.

Обычно соединения неметаллов. Связи направленные, прочные - минералы, как правило, прозрачные, хрупкие, твердые, с высокой температурой плавления.

Типы химической связи

Различают обменный и донорно-акцепторный механизмы образования ковалентной связи:

- 1) Обменный механизм. Каждый атом дает по одному неспаренному электрону в общую электронную пару;
- 2) Донорно-акцепторный механизм. Один атом (донор) предоставляет электронную пару, а другой атом (акцептор) свободную орбиталь для этой пары. Образованная таким путем связь называется донорно-акцепторной (типична для халькогенидов). Донорно-акцепторная связь имеет промежуточный характер между металлической, ионной и ковалентной видами связи, т.к. происходит обобществление электронов несколькими атомами. Чем больше таких электронов, тем выше «металличность» связи.

Типы химической связи

Если сгущения электронной плотности расположены симметрично между атомами, то ковалентная связь называется неполярной. Она может быть образована атомами одного и того же элемента, (молекулы одноэлементных газов H_2 , O_2 , N_2 , Cl_2 , структура алмаза и т.д.).

Если сгущение электронной плотности смещено к одному из атомов, то ковалентная связь называется полярной. Она образуется между атомами элементов, обладающих различающейся электроотрицательностью. Полярность связи тем больше, чем больше разность электроотрицательностей атомов.

Полярная ковалентная связь занимает промежуточное положение между чисто ковалентной связью и ионной связью. Так же, как и ионная, она может возникнуть только между двумя атомами разных элементов.

Типы химической связи

ИОННАЯ СВЯЗЬ обусловлена переносом валентных электронов с одного атома на другой с образованием положительных и отрицательных ионов и электростатическим взаимодействием между ними. Ионную связь можно рассматривать как предельный случай ковалентной полярной связи с полным переходом электронов от одного атома к другому, обычно от металла к неметаллу. Ионы, отдавшие электроны и имеющие положительный заряд, называются *катионами*, а принявшие электроны и имеющие отрицательный — *анионами*.

Связь ненаправленная. Катионы и анионы имеют различные радиусы, как следствие - разнообразие структур.

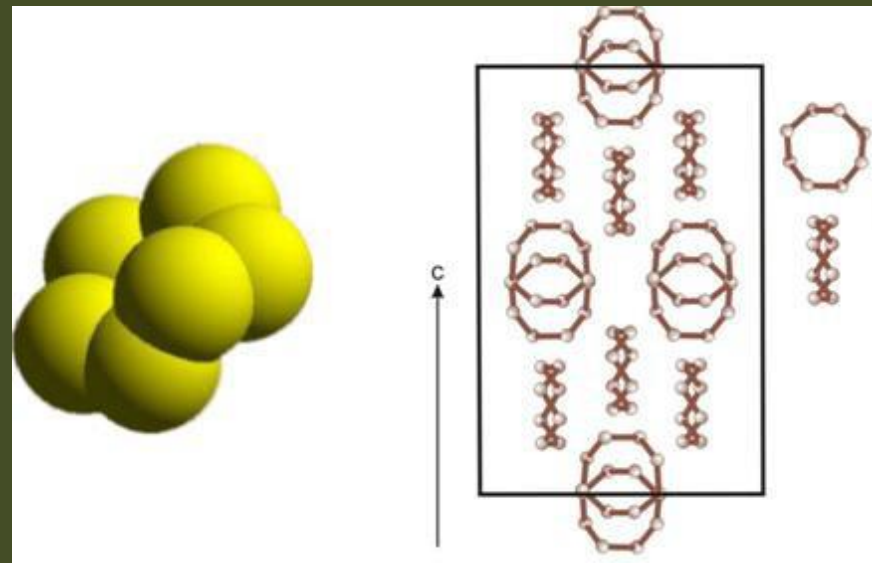
Ионная связь обладает высокой прочностью, что определяет высокие температуры плавления ионных соединений. Отсутствие свободных электронов приводит к низкой электропроводности веществ с ионной связью. Минералы прозрачные, хрупкие.

Типы химической связи

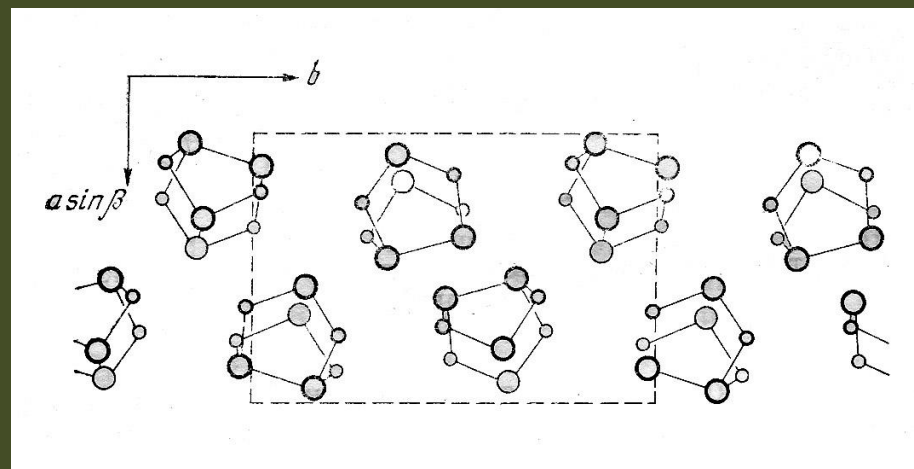
Остаточная (ван-дер-ваальсова) связь.

Образуется за счет остаточных электростатических сил, возникающих из-за неравномерного распределения зарядов в молекулах (их полярности).

Ван-дер-ваальсова связь — одна из самых слабых химических связей. Свойственна для гетеродесмических структур, но проявляются во всех кристаллах без исключения. Минералы проявляют низкую твердость и T плавления.



Островная структура α -S

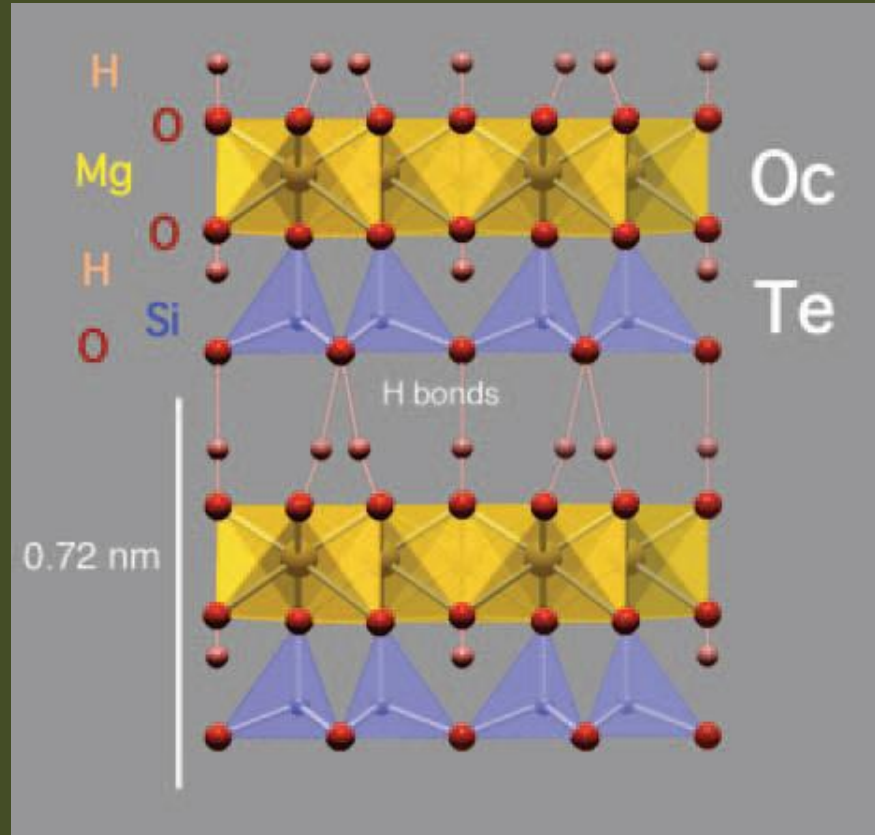


Островная структура реальгара

Типы химической связи

Водородная связь

Среди остаточных связей особое место занимает **водородная связь**, рассматриваемая часто как самостоятельный тип связи. Она возникает за счет коллективного использования протона соседними атомами кислорода. Водородная связь слабее ионной или ковалентной, но сильнее обычной ван-дер-ваальсовой.



Evans et al., 2013

Слоистая структура лизардита

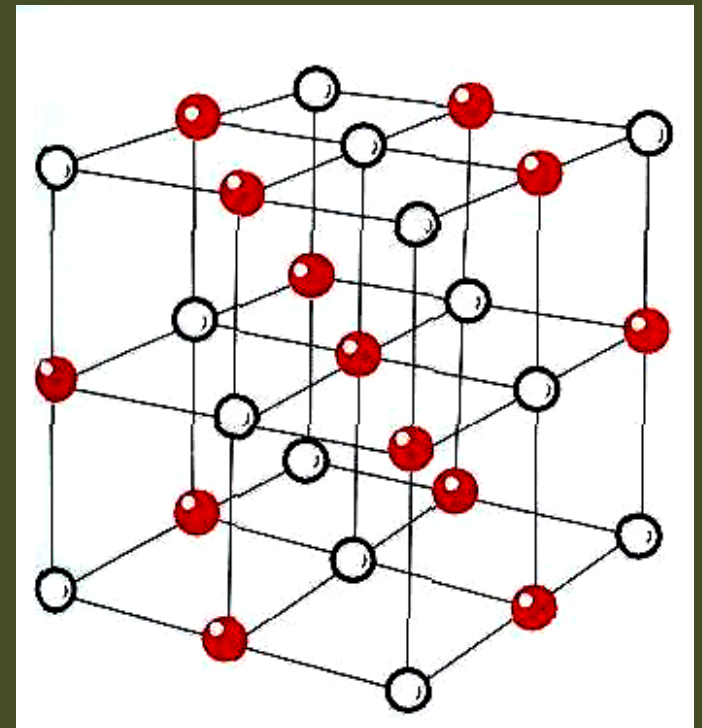
Важнейшие типы структур

Все многообразие кристаллических структур можно свести к пяти типам, отличающимся характером расположения атомов.

1. Координационные структуры

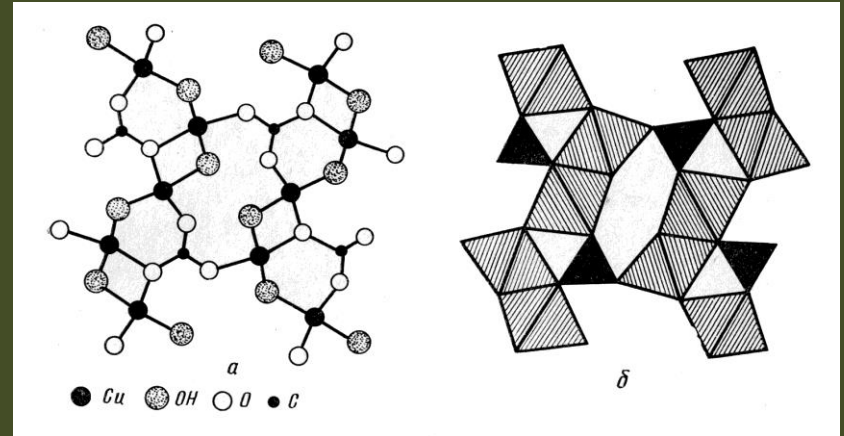
Гомодесмические структуры — все атомы связаны друг с другом одинаковыми или близкими по типу химическими связями

(минералы с металлической, ионной или ковалентной связью, обычно с плотнейшей упаковкой и одинаковым расстоянием между атомами).



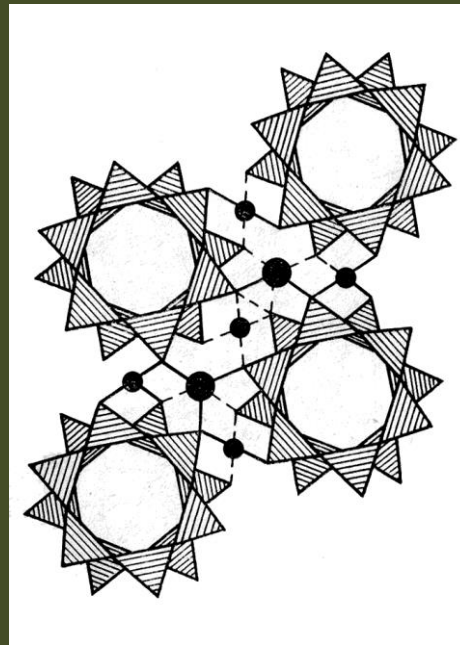
Важнейшие типы структур

Гетеродесмические структуры с гетерогенным распределением связей. Часто связи двух или более типов.

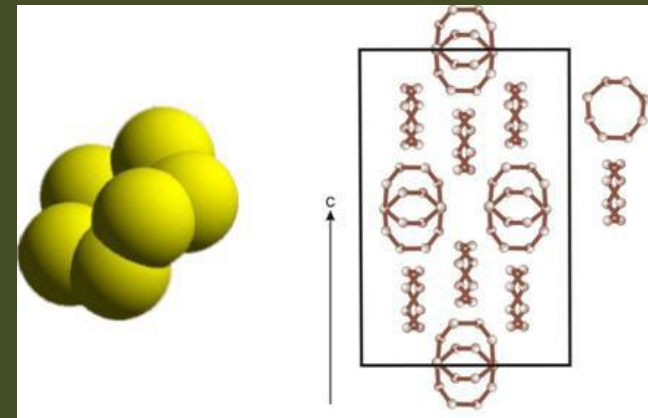


Структура малахита в шариковой и полиэдрической моделях

2. Островные структуры (структуры с различными межатомными расстояниями, в которых выделяются комплексные анионные радикалы или замкнутые молекулы)



Кольцевая структура берилла

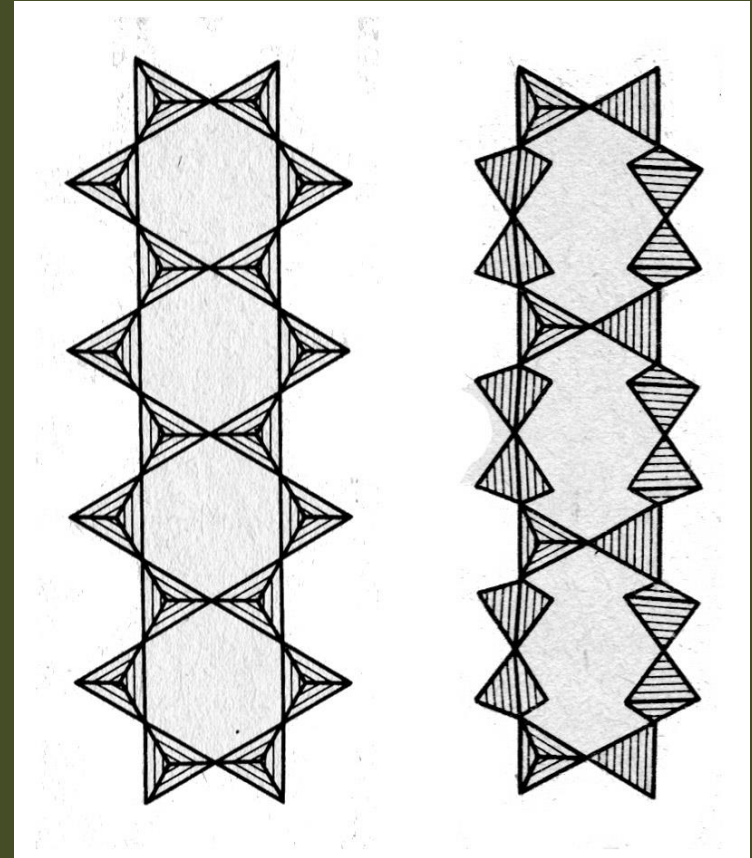
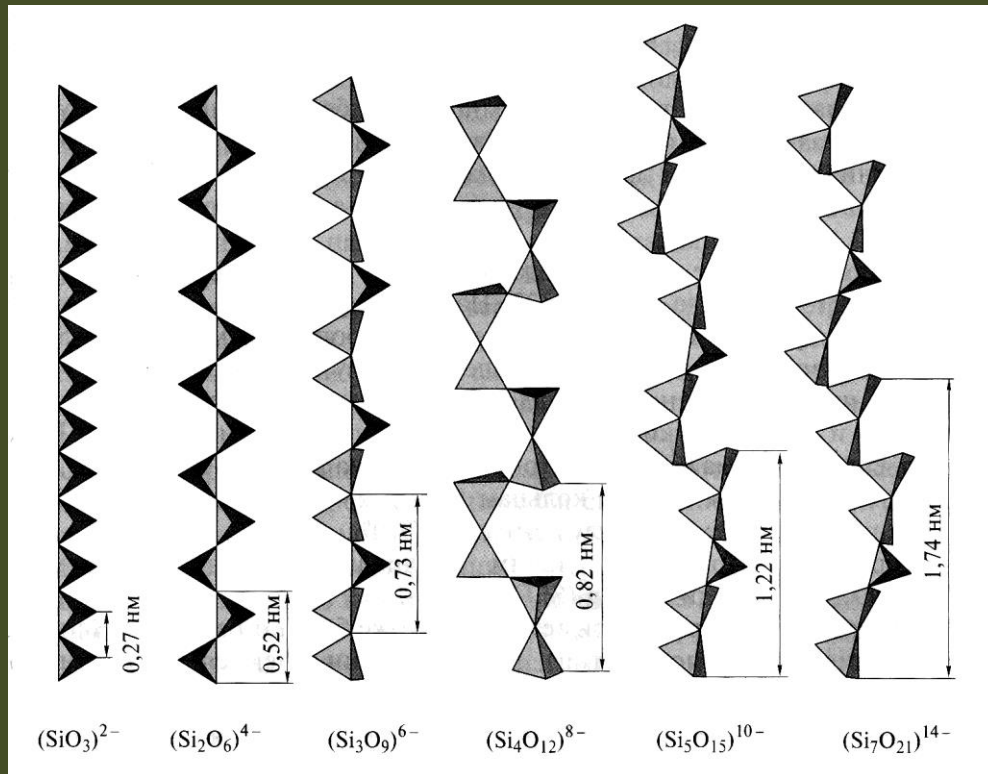


Островная структура α -S

Важнейшие типы структур

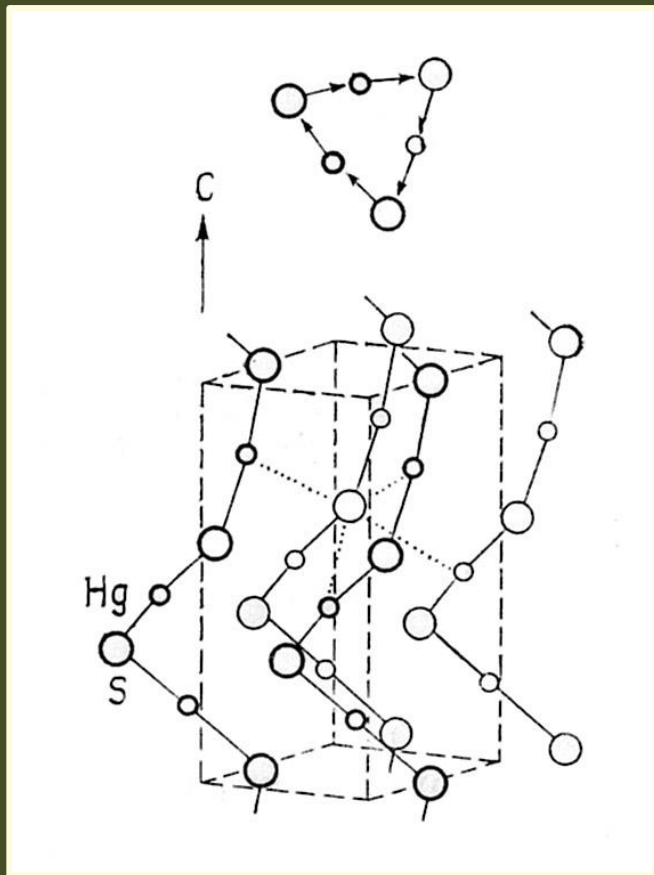
3. Цепочечные и ленточные структуры

(образованы бесконечными одномерными радикалами, которые состоят из линейно связанных координационных полиэдров)

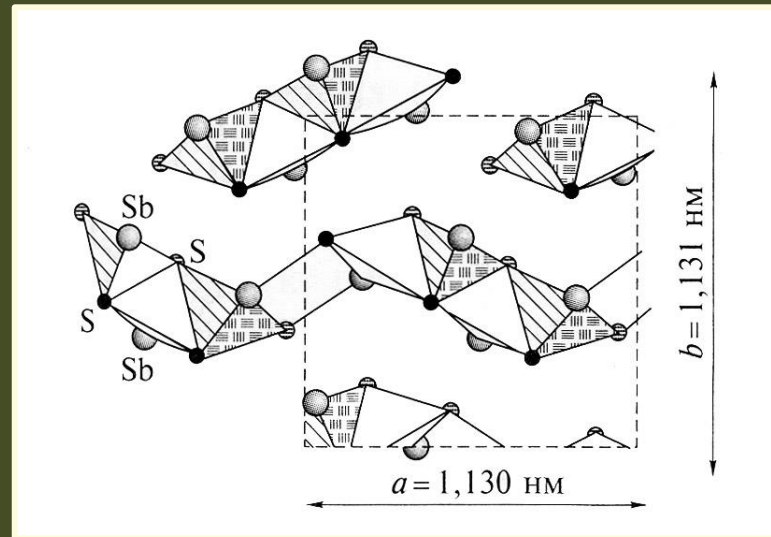


Амфиболовая и
ксонотлитовая ленты

Важнейшие типы структур



В структуре киновари параллельно оси c прослеживаются винтовые цепочки $-S-Hg-S-Hg-S-$ (КЧ $Hg=2$)



В структуре стибнита проявляются зигзагообразные цепочки $-Sb-S-Sb-S-Sb-S-Sb-$, которые связываются в ленты, вытянутые вдоль оси c .

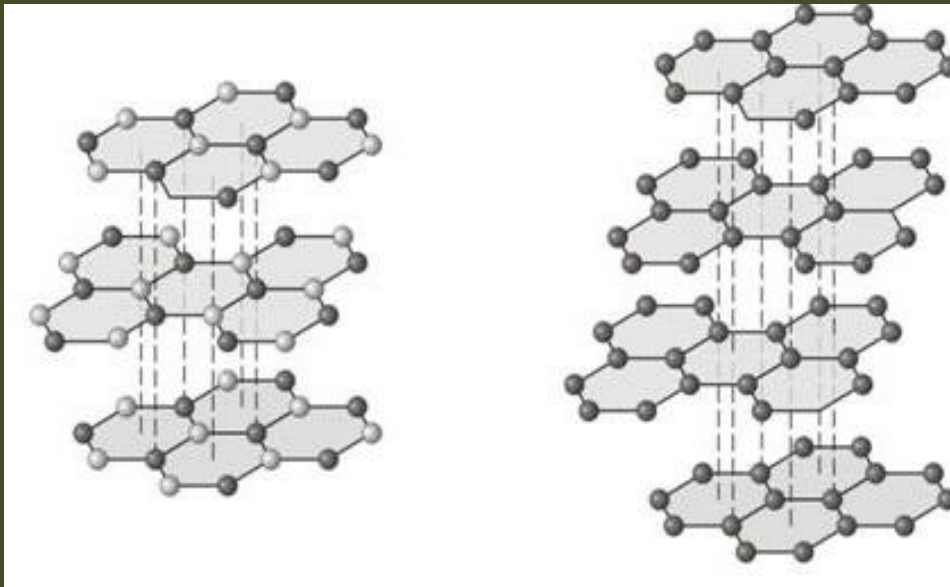
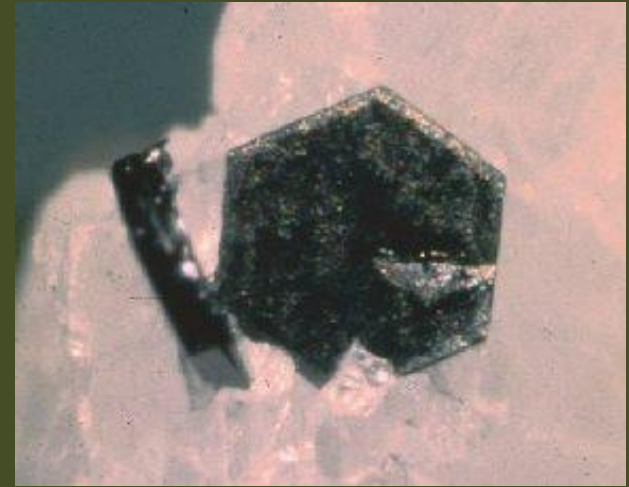


Радиально-лучистый агрегат уплощенных кристаллов стибнита, Румыния

Важнейшие типы структур

4. Слоистые структуры

В структурах минералов выделяются бесконечные слои (пакеты) атомов. Часто слои (пакеты) связаны друг с другом ван-дер-ваальсовыми или водородными связями.

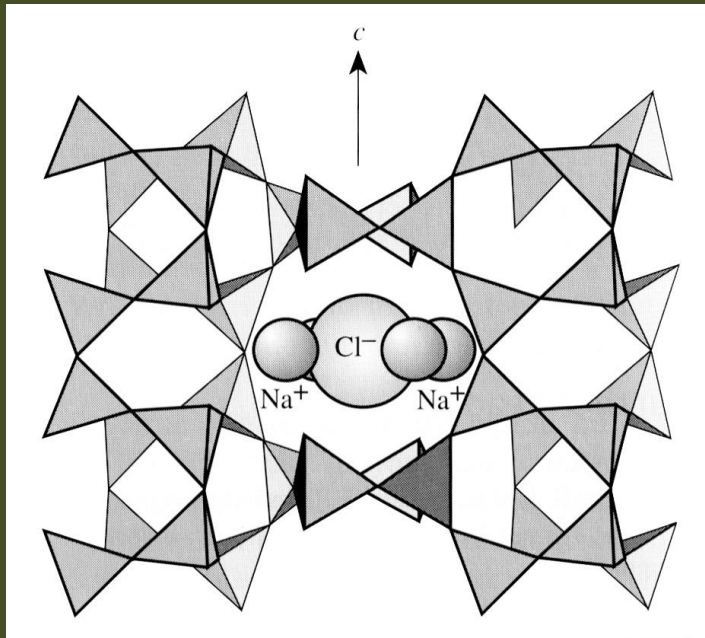


Углерод в графите находится в состоянии sp^2 -гибридизации. Р-орбитали, расположенные перпендикулярно плоскости сетки, не участвуют в этой гибридизации. Свободные электроны в межсеточном пространстве определяют электрическую проводимость графита и образование слабых ван-дер-ваальсовых связей между сетками.

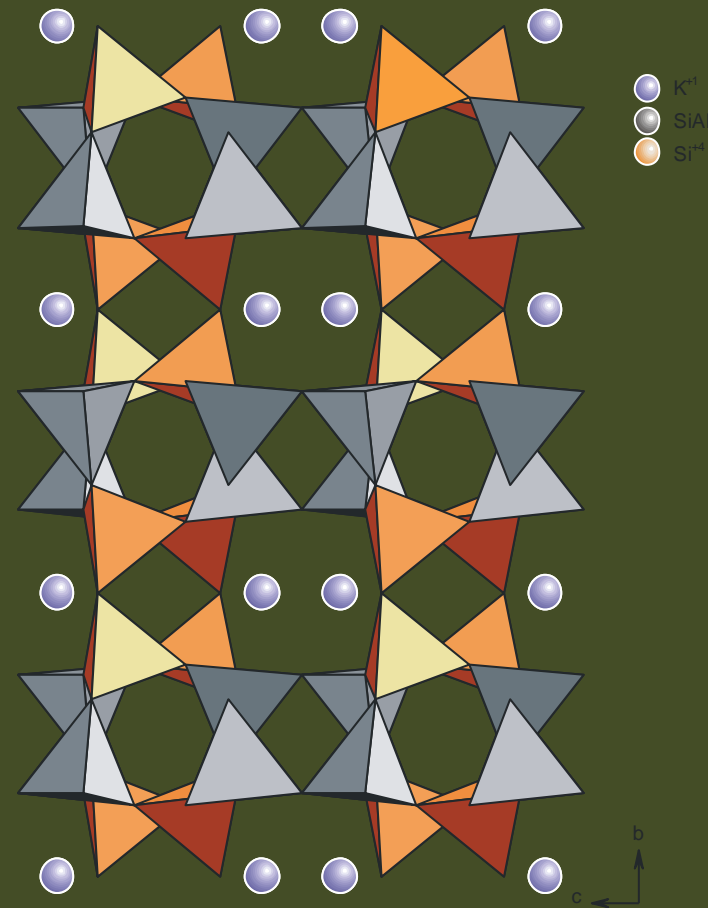
Важнейшие типы структур

5. Каркасные структуры

(характеризуются ажурным объемным соединением полиэдров. Часто имеют крупные пустоты, в которых могут размещаться крупные катионы, дополнительные анионы, молекулы воды).



Кристаллическая структура скаполита (мариалита)



Кристаллическая
структура ортоклаза

Полиморфизм

Полиморфизм (от греч. πολὺ - много, и μορφή – форма) - способность вещества существовать в различных кристаллических структурах, называемых *полиморфными модификациями*, устойчивых при определённых внешних условиях (температуре и давлении).

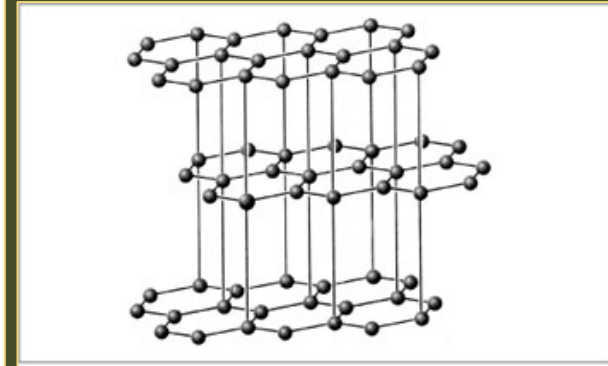
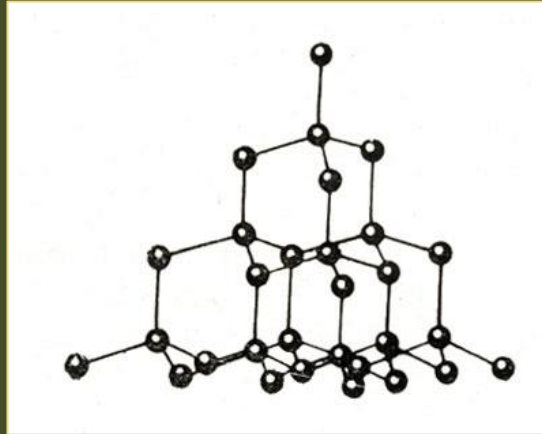
Каждая полиморфная модификация является самостоятельным минеральным видом (за исключением политипов).

Самородный углерод – *алмаз, лонсдейлит, графит, чаоит*.
 SiO_2 – *α -кварц, β -кварц, тридимит, кристобалит, коэсит, стишовит и др..*

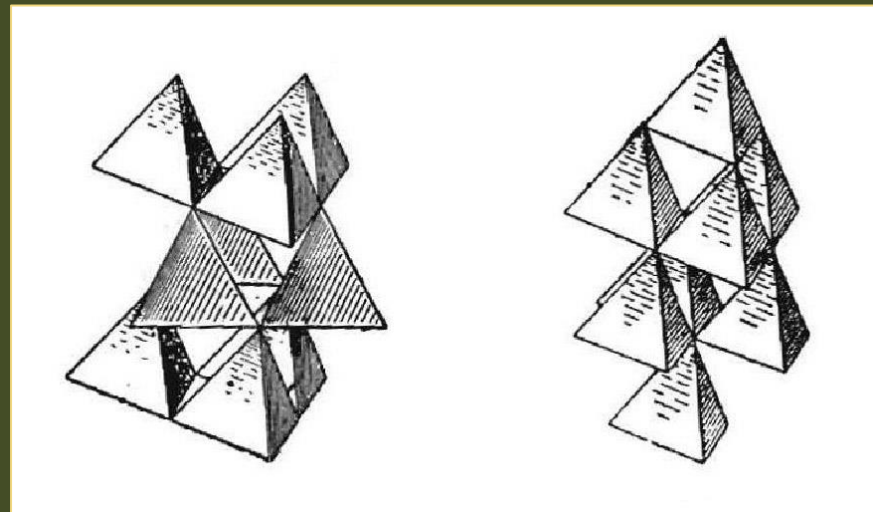
TiO_2 – *рутил, анатаз, брукит, акаогиит*.

Важнейшие типы полиморфных переходов

- С изменением КЧ (графит-алмаз, кварц-стишовит)

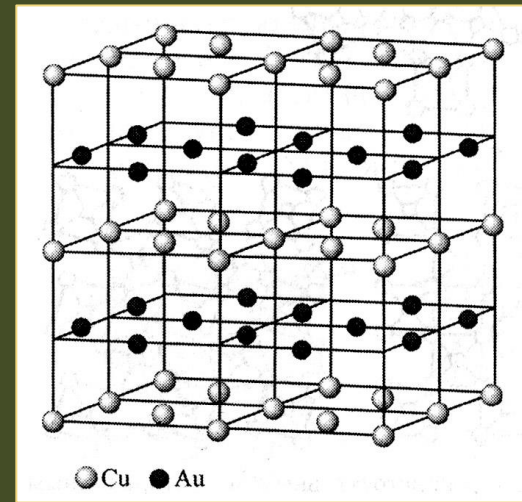


- С изменением взаимного расположения КП (сфалерит-вюртцит, α -кварц— β -кварц)

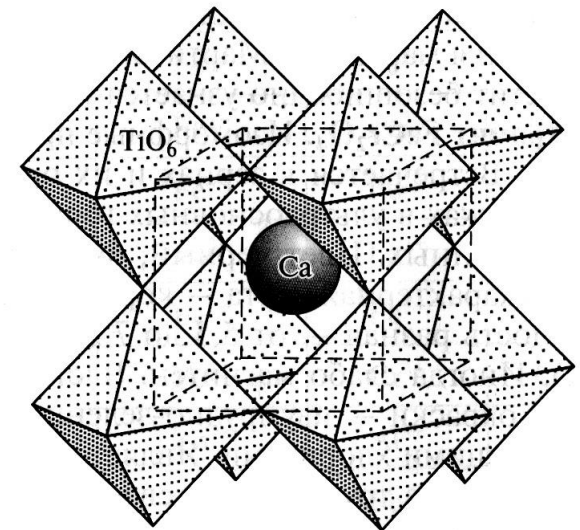
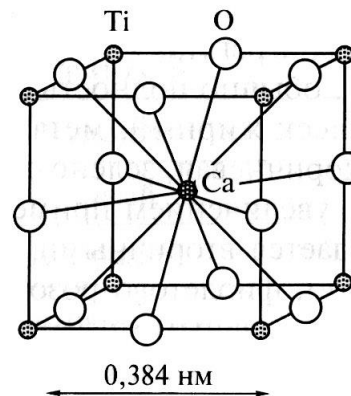


Важнейшие типы полиморфных переходов

- Превращения типа порядок-беспорядок ((Cu,Au)-CuAu, микролин-санидин)



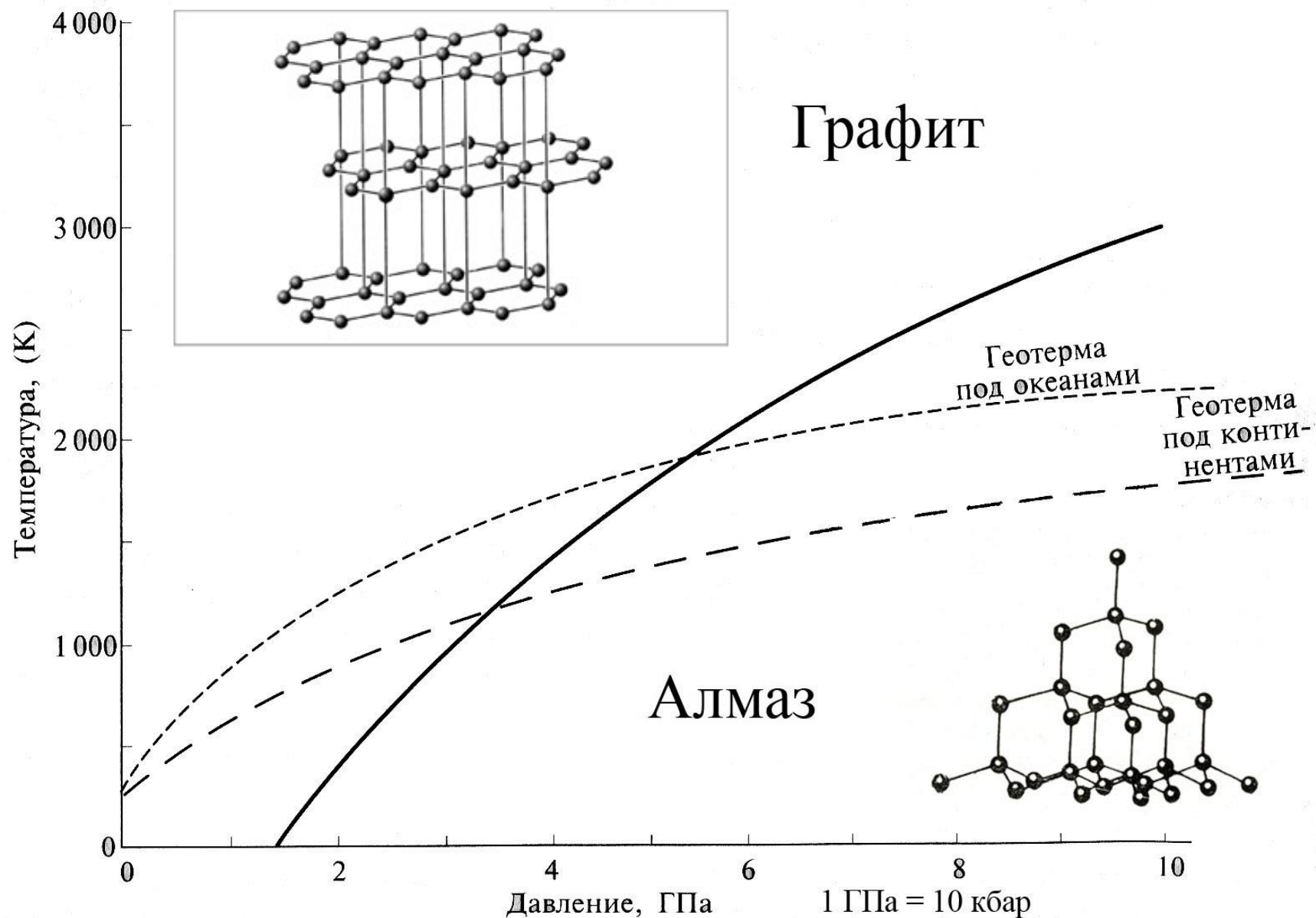
- Переходы типа смятия или сдвига (перовскит, лейцит)



Важнейшие виды (механизмы) полиморфных переходов:

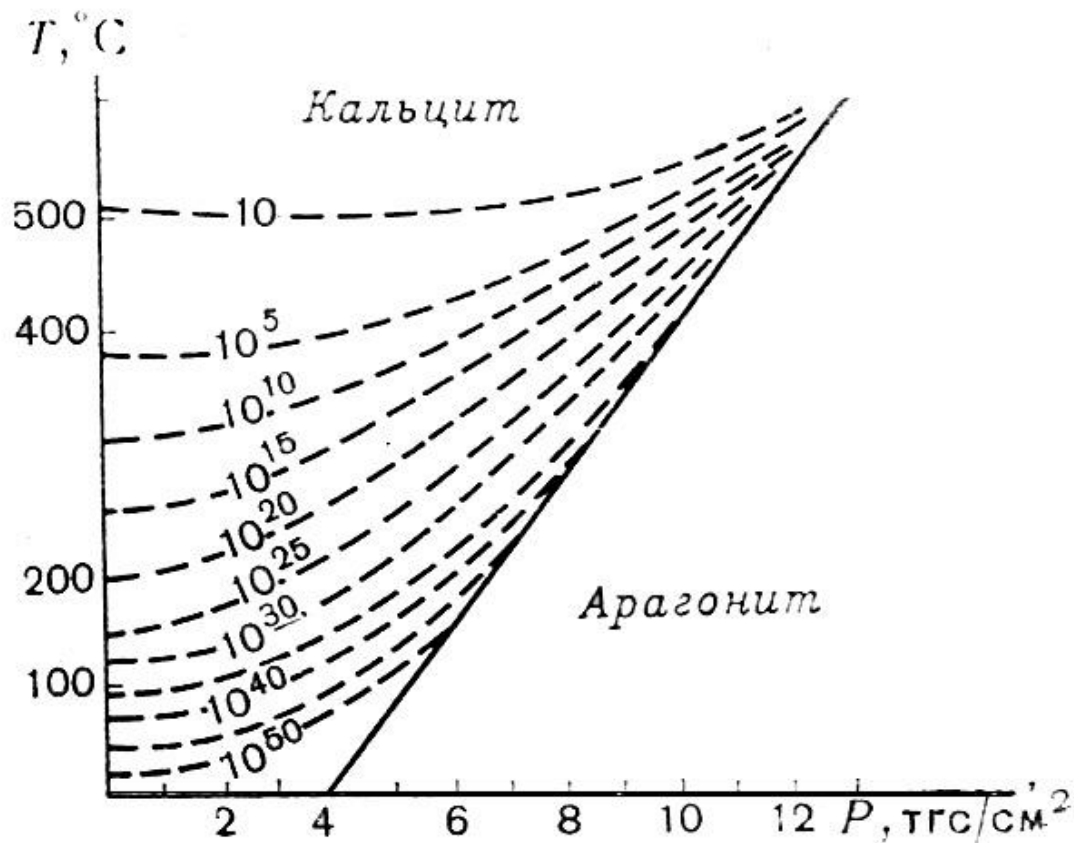
- а) реконструктивный переход с изменением структуры
для перехода от одной модификации к другой необходим разрыв связей и полная перестройка структуры. Энергетический барьер перехода очень высок и менее устойчивая полиморфная модификация может длительное время существовать в метастабильном состоянии.
- б) переход искажения
происходит поворот отдельных атомных групп друг относительно друга без разрыва основных связей

Реконструктивные переходы



Реконструктивные переходы

Переход кальцит (триг., $KЧ_{Ca}=6$) – арагонит (ромб., $KЧ_{Ca}=9$)



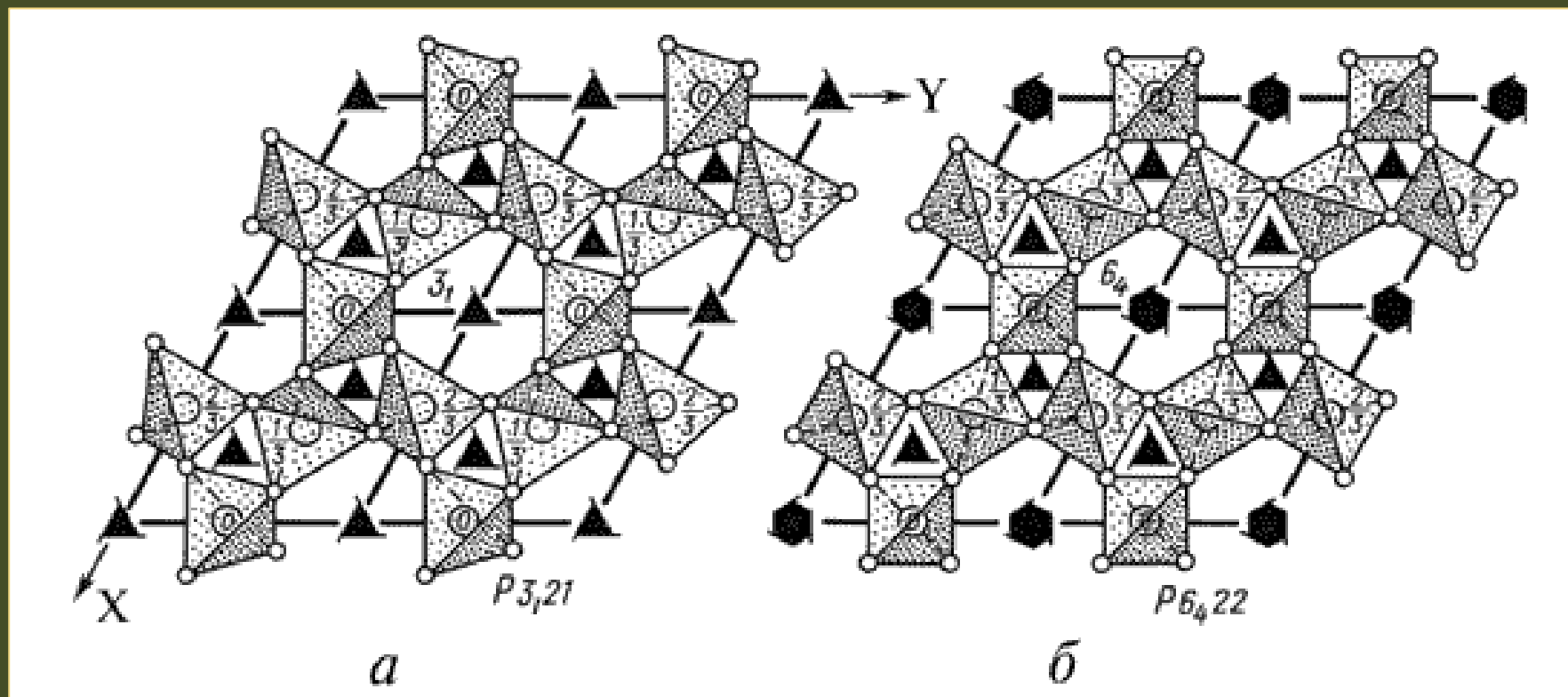
Р-Т диаграмма
равновесия кальцит-
арагонит. Пунктир –
изохроны
превращения
арагонита в кальцит на
99 % (в мин.).

10^5 – 70 дней

10^{15} – 1,9 млрд лет

Годовиков, 1975

Переход искажения α -кварц – β -кварц (незакаливаемый!)



α -кварц

β -кварц

Вынужденные равновесия

Полиморфные переходы также могут тормозиться или останавливаться в случаях:

1. При нахождении кристаллов минералов, которые должны испытать полиморфный переход при снижении T и/или P , внутри кристалла минерала (**минерала–контейнера**) с высокой прочностью и малым коэффициентом термического и барического расширения/сжатия. Типичные примеры - пироп (для коэсита), циркон (для алмаза, коэсита, арагонита и др.).
2. При наличии в кристаллах минералов, которые должны испытать полиморфный переход при снижении или повышении T и/или P , заметного количества **включений** дисперсной фазы (например, микрокристаллов графита в андалузите) или **изоморфных примесей**, которые резко меняют параметры полиморфных переходов.

Вынужденные равновесия в минералах

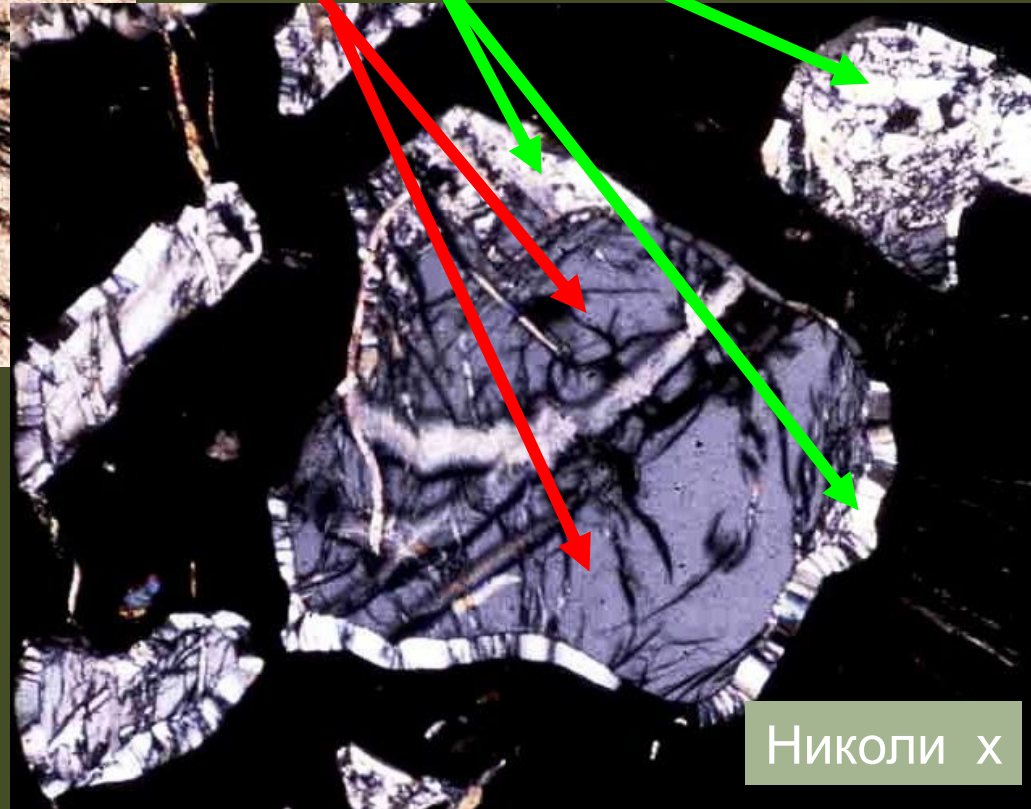
Почему сосуществуют коэсит и кварц?



При 1 николе

Пироповые кварциты (метаморфизованные кварцевые песчаники с монтмориллонитовым цементом). Dora Maira, Piemonte, Северо-итальянские Альпы

Данные Э.М.Спиридонова



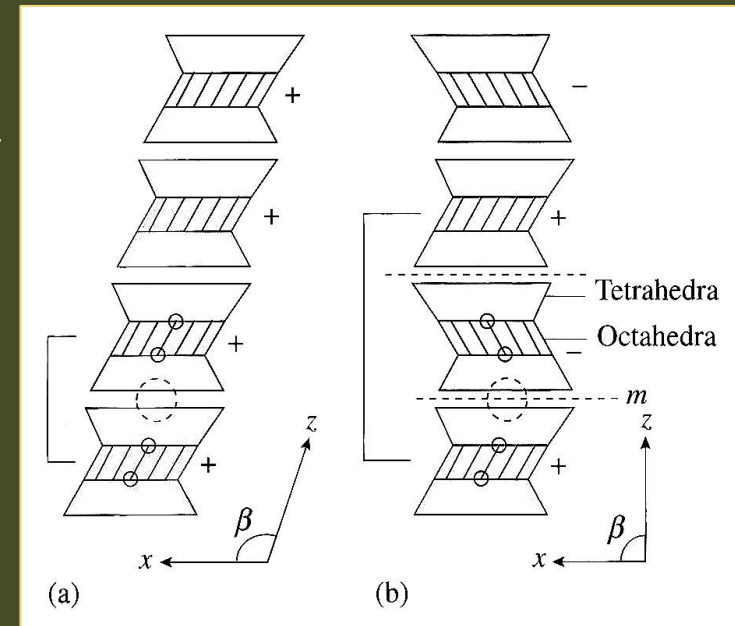
Николи x

Политипия

Политипия (от греч. polys - многочисленный и typos - форма, образец) - явление существования у минералов двух или более кристаллических структур слоистого типа, которые отличаются последовательностью чередования и/или углами поворота кристаллографически сходных слоев.

Представляет собой частный случай полиморфизма.

Политипы относятся к одному минеральному виду и рассматриваются как структурные разновидности.



*Политипия в слоистых силикатах
a – 1М-политип
b – 2О-политип*

Политипия

Для обозначения политипов используют символы (символы Рамсделла), в которых цифрой указывается число слоев или пакетов в элементарной ячейке, а следующей за цифрой буквой - тип ячейки

(С - кубическая, Q - тетрагональная, H - гексагональная, O - ромбическая, M - моноклинная, ТС - триклинная, R - ромбоэдрическая ячейка, T - тригональная).

Например, известны политипные модификации 2H и 3R молибденита, 2H, 4H, 3R вюртцита, 1M, 2M1, 2M2, 3T, 6H, 2O слюд. Цифровой индекс справа от буквы используют для различия структур (политипов), относящихся к одной сингонии.

Изоморфизм

Изоморфизм – способность атомов (ионов или группировок) замещать другие атомы (ионы или группировки) в соединениях переменного состава *без изменения их кристаллических решеток.*

Условия изоморфизма:

1. Разность радиусов не должна превышать 15% (обычно) от размера меньшего атома (правило Гримма-Гольдшмидта);
2. Сходство химических свойств замещающих друг друга элементов (например, нет смешиваемости между NaCl и CuS из-за различий в строении внешних электронных оболочек и разного характера химических связей в структурах);
3. Сохранение электронейтральности структуры.

Важно помнить, что изоморфная емкость минералов возрастает с увеличением температуры его кристаллизации.

Типы изоморфизма

1) межатомный

изовалентный изоморфизм

гетеровалентный изоморфизм

а) без изменения общего числа атомов

б) с изменением общего числа атомов

Изоморфные замещения с вычитанием

Изоморфные замещения с внедрением

2) блочный (кластерный)

По степени совершенства выделяют неограниченный (совершенный) и ограниченный (несовершенный) изоморфизм.

Изоморфизм

Правило полярности Гольдшмидта–Ферсмана - ион с меньшим радиусом или бóльшим зарядом входит как примесь в кристаллическую структуру легче, чем ион с бóльшим радиусом или меньшим зарядом (на фоне стремления смешанного кристалла к минимуму электростатической энергии вхождение в структуру иона с меньшим размером или бóльшим зарядом “укрепляет решетку”, т.е. является “энергетически выгодным”).

а) *изовалентное* замещение: ион с меньшим радиусом будет входить в общую кристаллическую структуру легче, чем ион с большим радиусом, занимающий ту же позицию (Na^+ охотнее замещает K^+ в KCl , чем более крупный K^+ будет замещать Na^+ в NaCl).

б) *гетеровалентное* замещение: ион с бóльшим зарядом входит в кристалл легче, чем ион с меньшим зарядом, занимающий ту же кристаллографическую позицию (Mg^{2+} может замещаться на Sc^{3+} , а обратное замещение маловероятно ($r_{\text{Mg}(2+)}=0.72 \text{ \AA}$, $r_{\text{Sc}(3+)}=0.75 \text{ \AA}$)).

Твердые растворы

Минералы переменного состава именуют **ТВЕРДЫМИ РАСТВОРАМИ**. При разных соотношениях компонентов твердые растворы обладают близкими или одинаковыми структурами.

Твердые растворы образуются как в двойных, так и в многокомпонентных системах (шпинелиды, гранаты, пироксены, полевые шпаты и др.).

Выделяют ограниченные и неограниченные твердые растворы.

МИНАЛ — **реальный** или **теоретический** конечный член твердого раствора (изоморфного ряда). Это же понятие иногда обозначается термином “молекула”, что неуместно, т. к. структуры м-лов, как правило, не относятся к молекулярному типу и никаких реальных молекул в них нет.

Минералы - твёрдые растворы

1. Твёрдые растворы замещения.

2. Твёрдые растворы внедрения. Типичные твёрдые растворы внедрения – минералы со структурой близкой халькопириту, обогащённые металлами:

халькопирит $\text{Cu}_{16} \text{Fe}_{16} \text{S}_{32}$

талнахит $\text{Cu}_{18} \text{Fe}_{16} \text{S}_{32}$

моихукит $\text{Cu}_{18} \text{Fe}_{18} \text{S}_{32}$

путоранит $\text{Cu}_{16-18}(\text{Fe}, \text{Ni})_{18-19} \text{S}_{32}$

Плотность твёрдых растворов внедрения выше, чем у исходных веществ.

3. Твёрдые растворы вычитания (дефектные) можно рассматривать как твёрдые растворы внедрения вакансий (дефектов). Плотность твёрдых растворов вычитания ниже, чем у исходного вещества, на базе которого они образованы. Таков пирротин Fe_{1-x}S , образованный на базе троилита FeS .

Явления распада в твёрдых растворах без изменения валового состава.

Минералы – твёрдые растворы, как правило, отвечают системам с ограниченной взаимной растворимостью при пониженных температурах. При снижении температуры наступает пересыщение и происходят явления распада высокотемпературных твёрдых растворов.

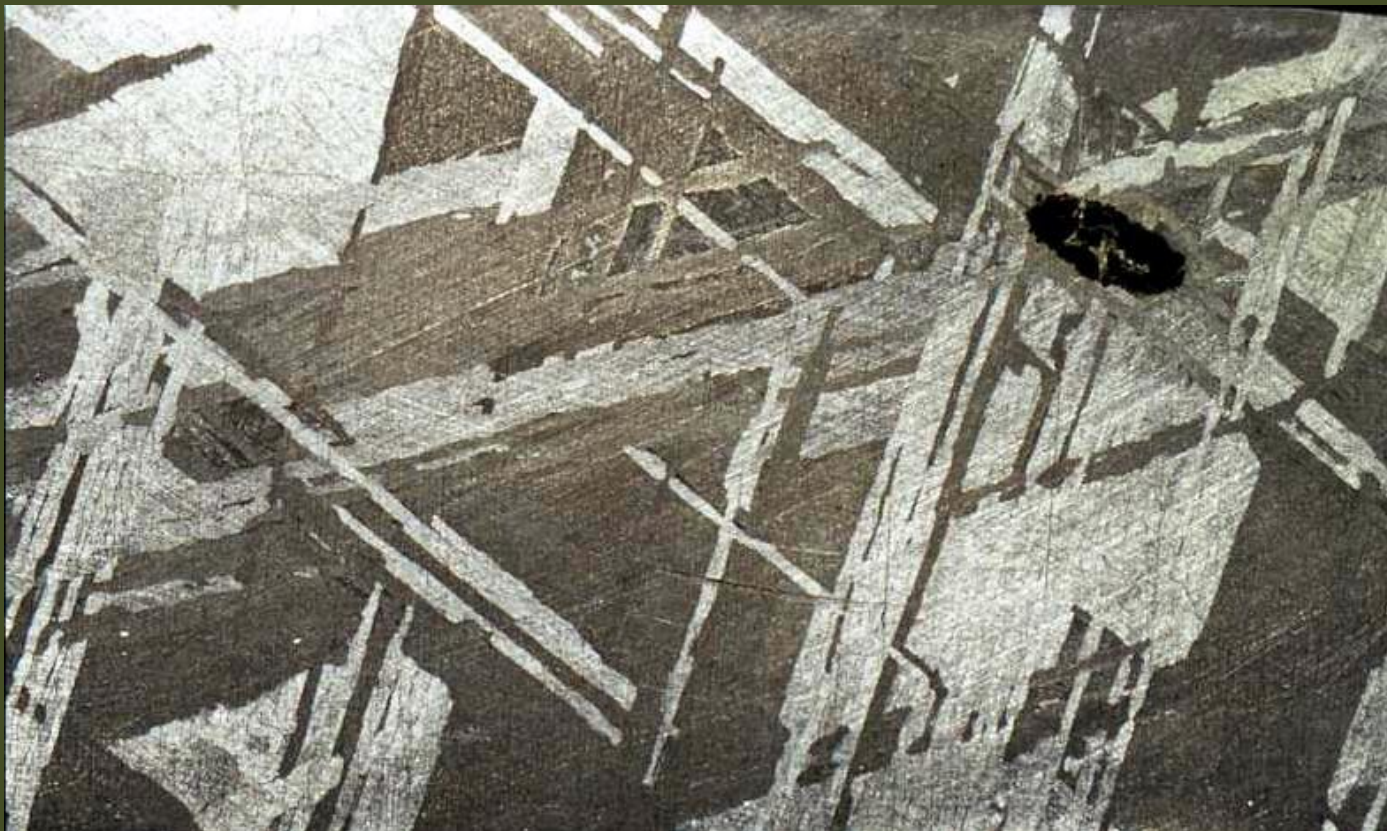
Типичные примеры распавшихся твердых растворов:

*магнетит $FeFe_2O_4$ – герцинит $FeAl_2O_4$ – ульвошпинель Fe_2TiO_4
касситерит SnO_2 – рутил TiO_2
ильменит $FeTiO_3$ – гематит $FeFeO_3$ – корунд $AlAlO_3$
альбит $Na[AlSi_3O_8]$ – КПШ $K[AlSi_3O_8]$*

В процессе распада твердого раствора происходит перераспределение атомов в структуре с формированием новых фаз – продуктов распада твердого раствора. *Важное следствие – при быстром охлаждении твердый раствор может быть «заморожен».*

Два типа распада твёрдых растворов: когерентный и спинодальный.

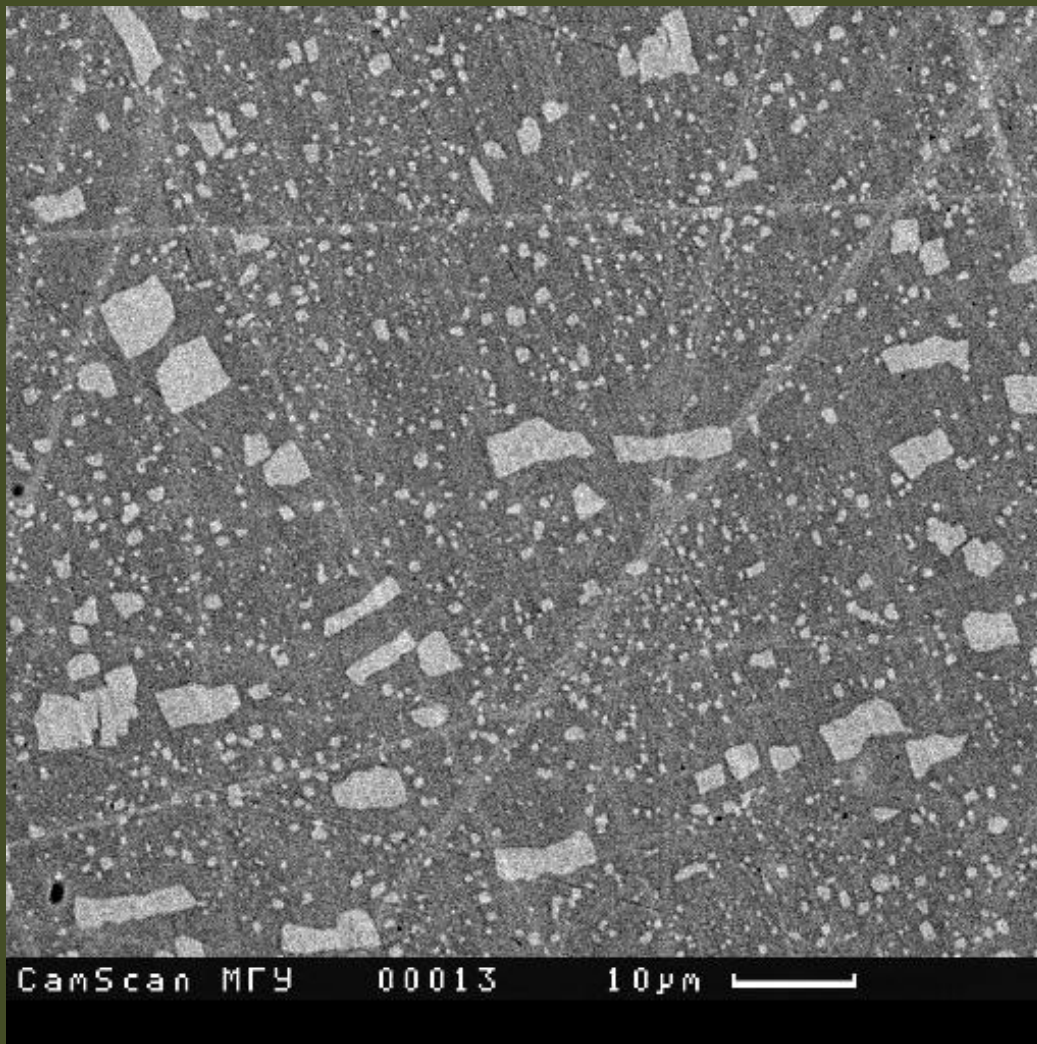
Когерентный распад - гетерогенный распад с образованием зародышей новых фаз. Возникают пластинчатые срастания двух фаз. Толщина пластин – ламелл распада – функция температуры и скорости остывания. Как правило, такого типа распад проявляется при достаточно медленном остывании.



Видманштеттовы
фигуры

*Камасит +
тэнит. Чёрное –
шрейберзит
(Fe,Ni)₃P*

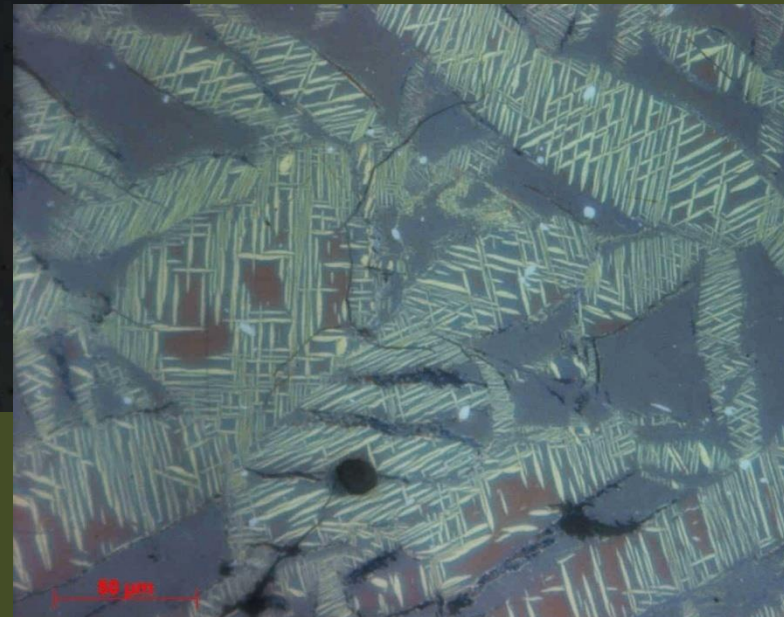
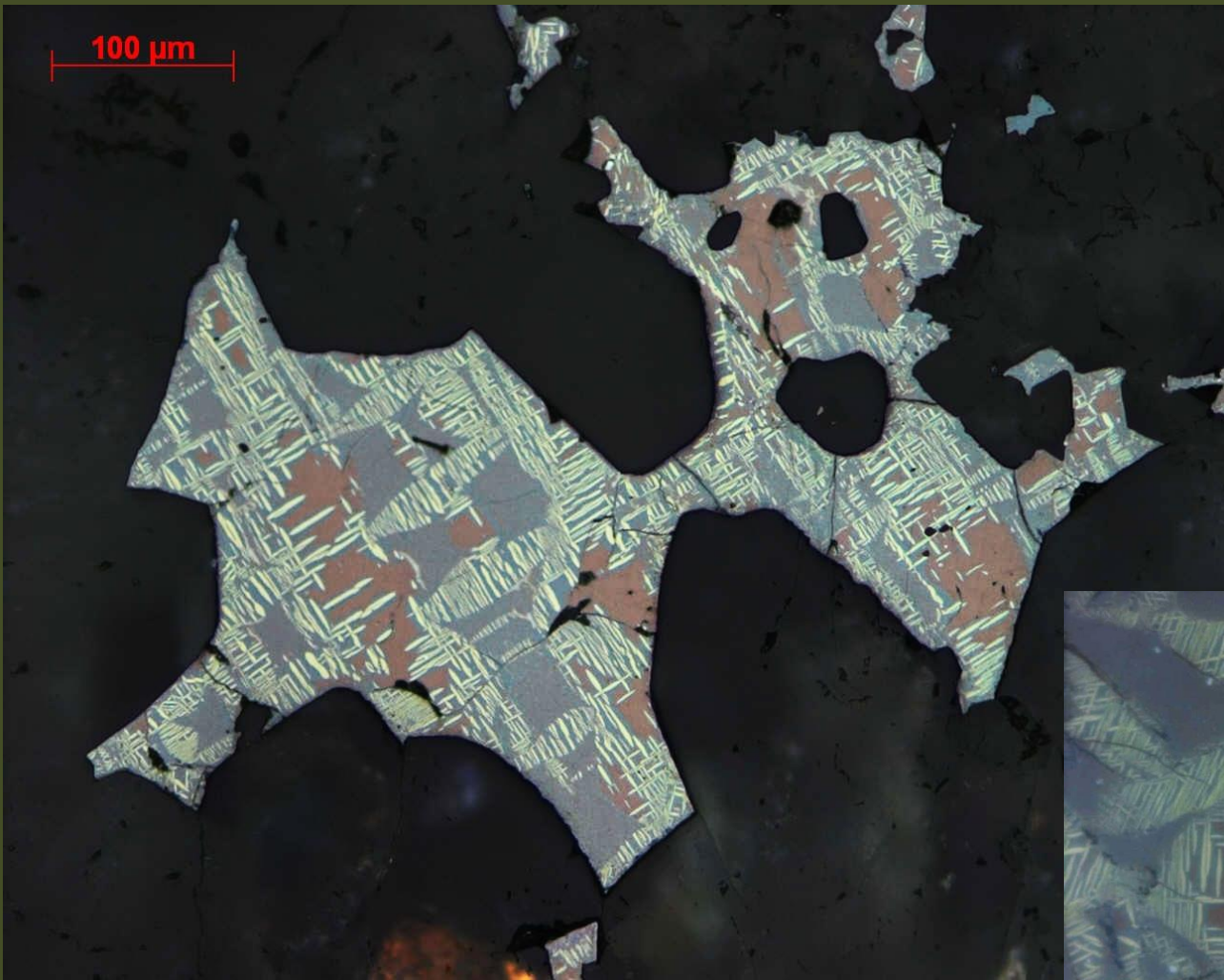
Изоферроплатина (матрица) с тельцами распада иридия, Феклистовский м-в, Шантарские острова.



Двухстадийный
распад

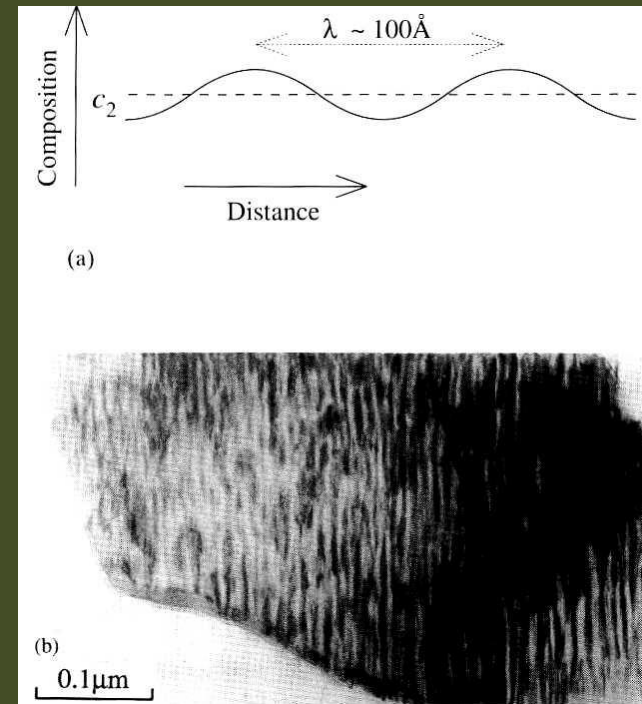
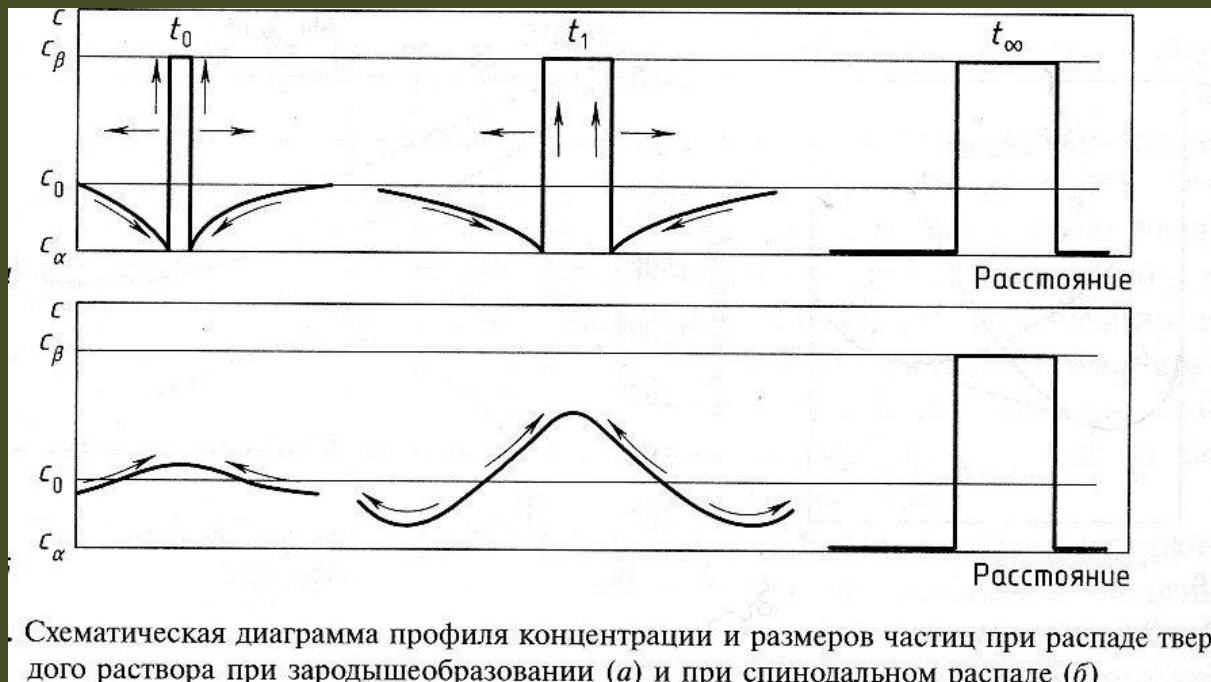
Фотография
в
отражённых
электронах

Многоступенчатый распад борнита, Au-Ag-Te проявление Телевеем, Чукотка



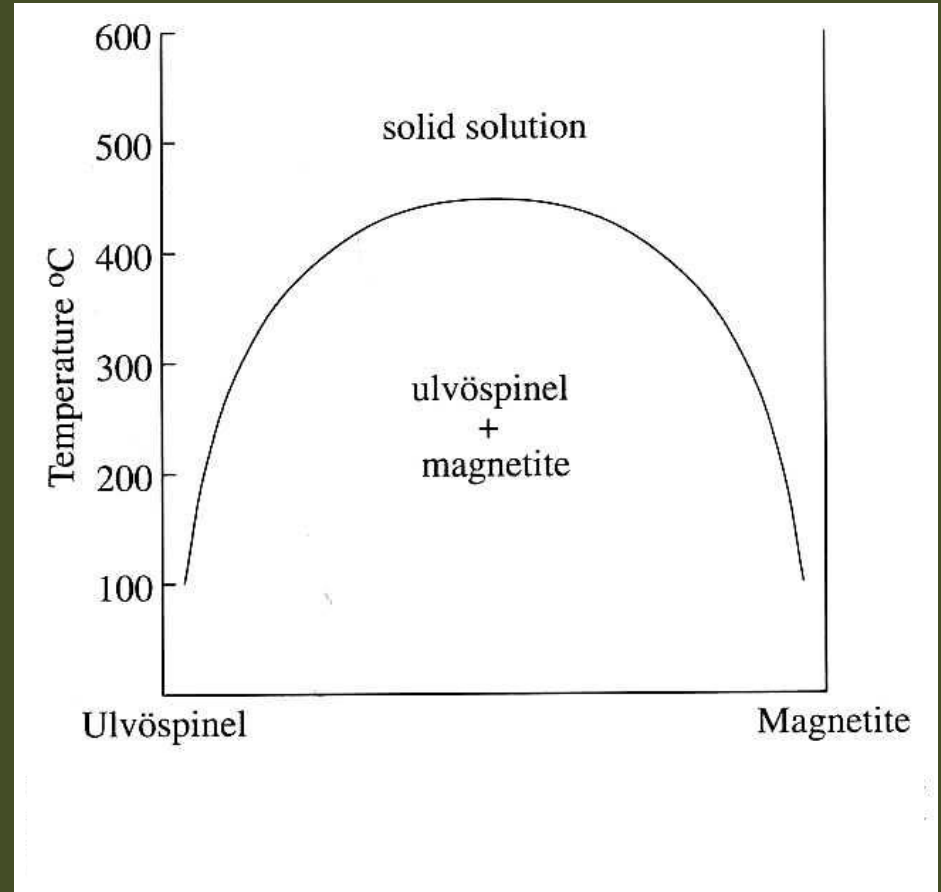
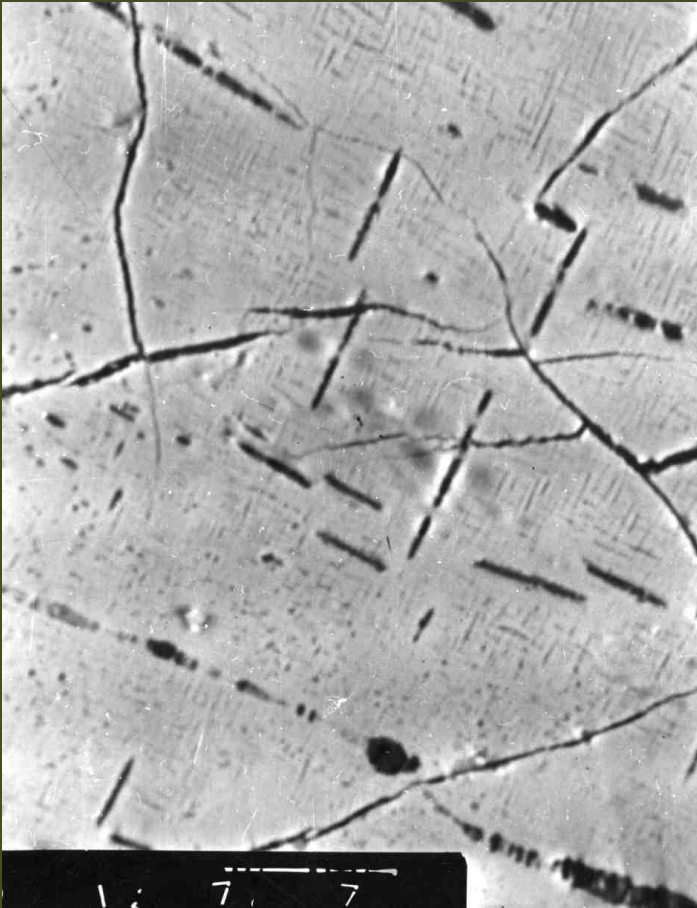
Два типа распада твёрдых растворов: когерентный и спинодальный.

Спинодальный распад – распад гомогенный, идущий без образования зародышей сразу по всему объёму кристалла. Возникает при полной потере устойчивости твердого раствора при быстром охлаждении. Структуры спинодального распада обычно чрезвычайно тонкие, из-за чего они в геологическом времени мало устойчивы и со временем превращаются в стандартные пластинчатые структуры распада.



Распад твердого раствора

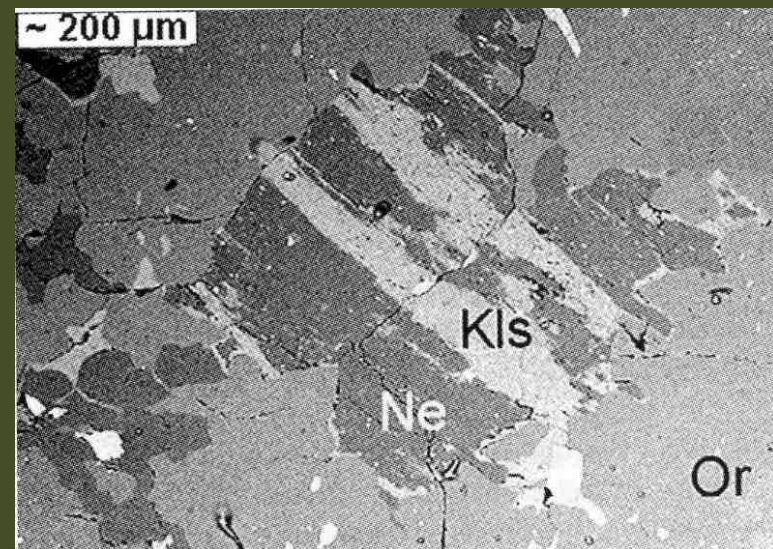
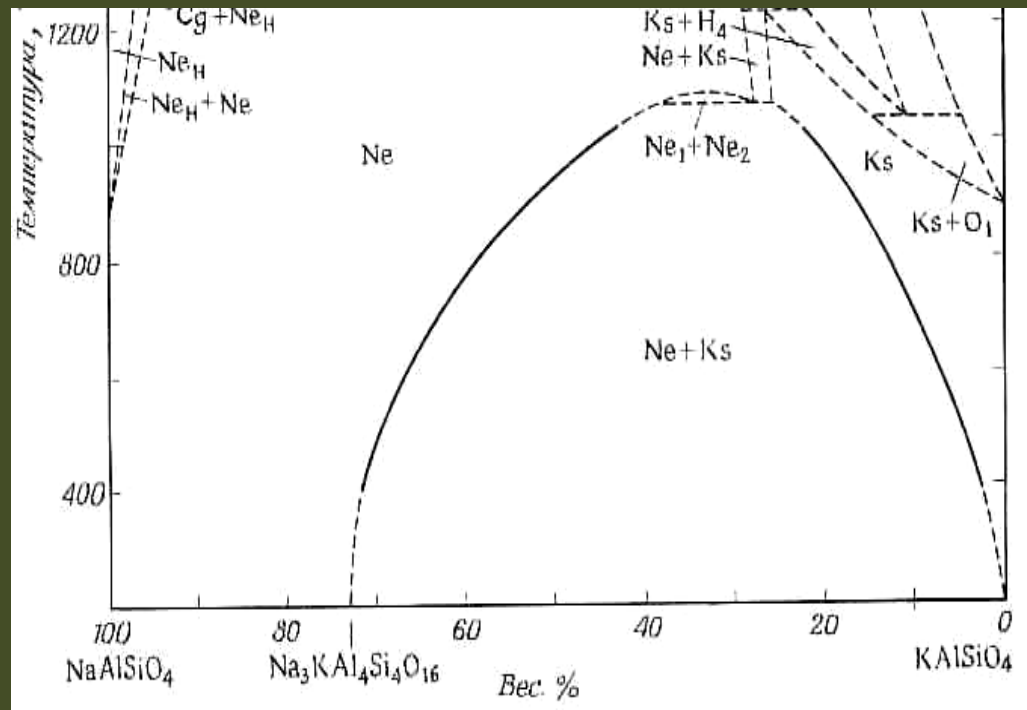
Состав твердых растворов можно использовать для оценки T их формирования.



Магнетит FeFe_2O_4 (светлый) — ульвошпинель Fe_2TiO_4 (серая) — шпинель $(\text{Mg}, \text{Fe})\text{Al}_2\text{O}_4$ (чёрная).

Ильменит-титаномagnetитовые оливиновые клинопироксениты, Северный Казахстан. Фото в отражённом свете. Данные Спиридонова Э.М.

Распад твердого раствора



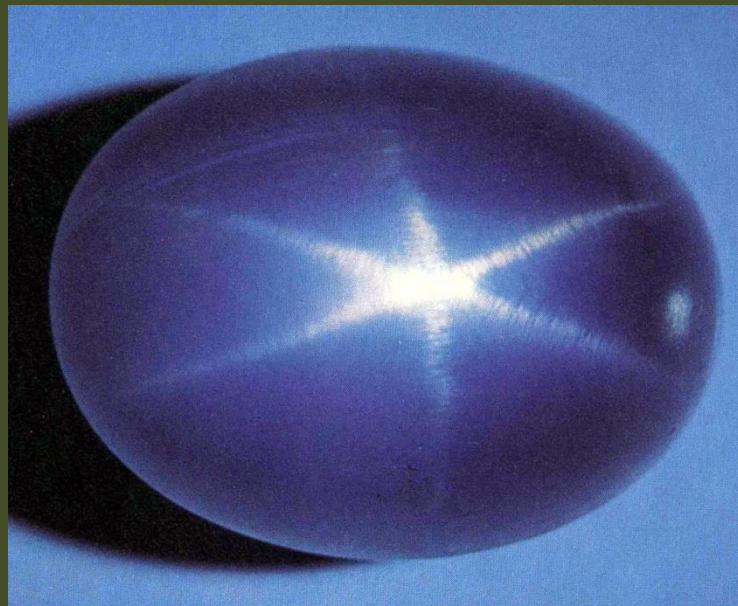
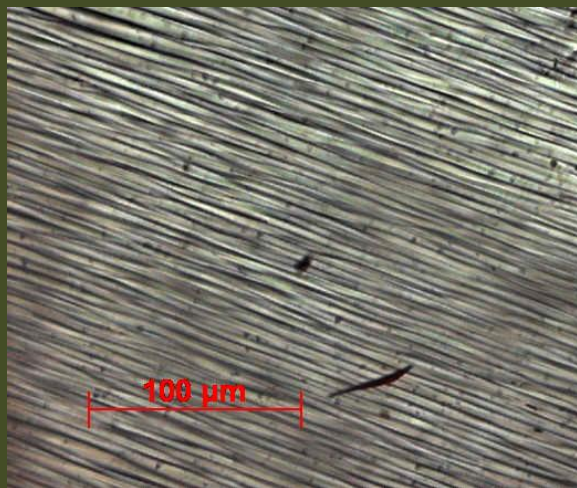
Система NaAlSiO_4 - KAlSiO_4

Для магматического нефелина характерны структуры распада с образованием микровключений кальсилита (признак для разделения магматического и метасоматического нефелина).

Со структурами распада твердых растворов связаны разнообразные оптические эффекты в минералах



Иризирующий ПШ



Звёздчатый сапфир (25 ст).
Гранулиты. Шри-Ланка.



Ламелли рутила в корунде

Методы исследования минералов

На сегодняшний день в науках геохимического цикла используется более 160 методов исследования вещества

Спектроскопические методы – подразумевают анализ спектров взаимодействия электромагнитного излучения с веществом.

Позволяют решать разнообразные задачи – исследовать структурные особенности минералов, природу окраски минералов, их химический состав и т.д.

Микроскопия – совокупность методов для наблюдения и регистрации увеличенных изображений объектов

Дифрактометрия

Методы анализа химического состава минералов

Масс-спектрометрические методы

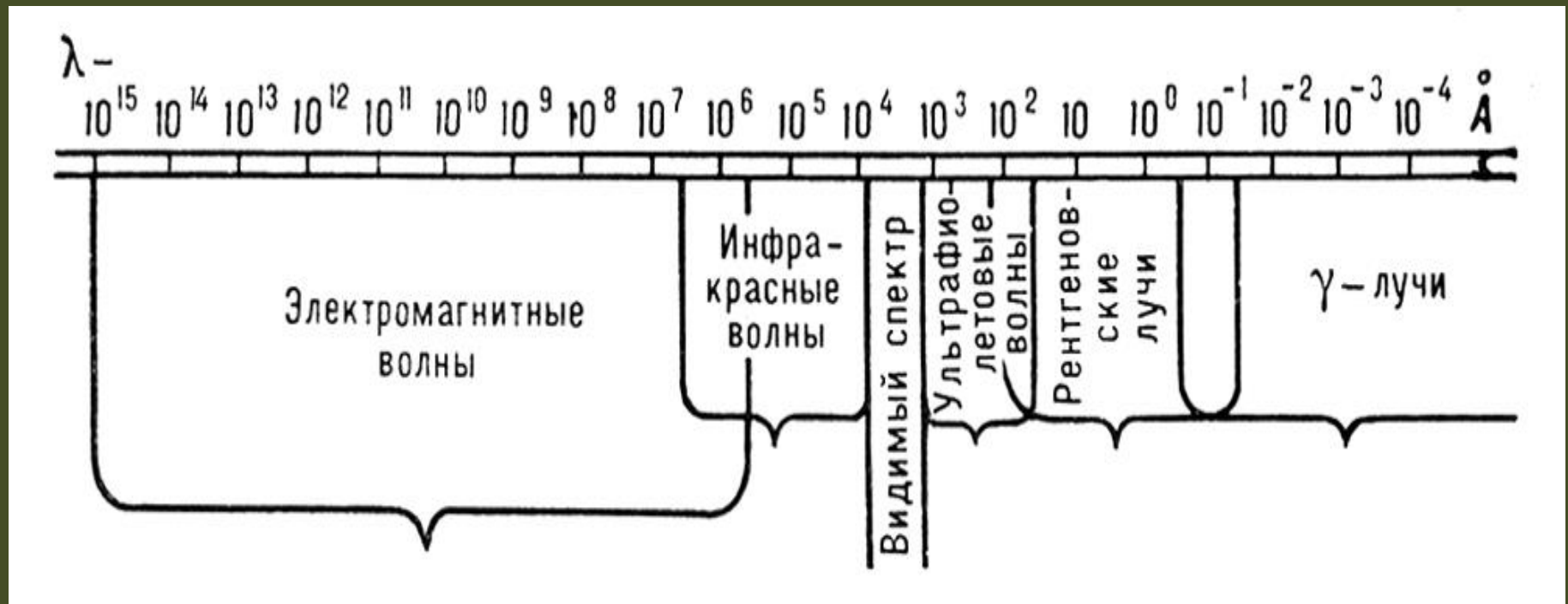
Ядерно-физические методы

Экспериментальные методы

Термодинамика минералов

Спектроскопические методы

Шкала электромагнитного излучения



↑
ЭПР

ИК-спектроскопия
КР

↑
Оптическая и УФ-
спектроскопия
Люминесценция м-ов

↑
ЯГР
Рентгено-
спектральные методы

Микроскопические методы

Максимальное разрешение d (минимальное расстояние между двумя объектами, при котором они различимы) определяется по формуле:

$$d = \lambda / 2A$$

где λ – длина волны
излучения (для видимого
света 380—760 нм)

A - апертура объектива
(микроскопа)



Максимальное разрешение оптического микроскопа составляет около 0.2 мкм.

Микроскопические методы

Электронные микроскопы

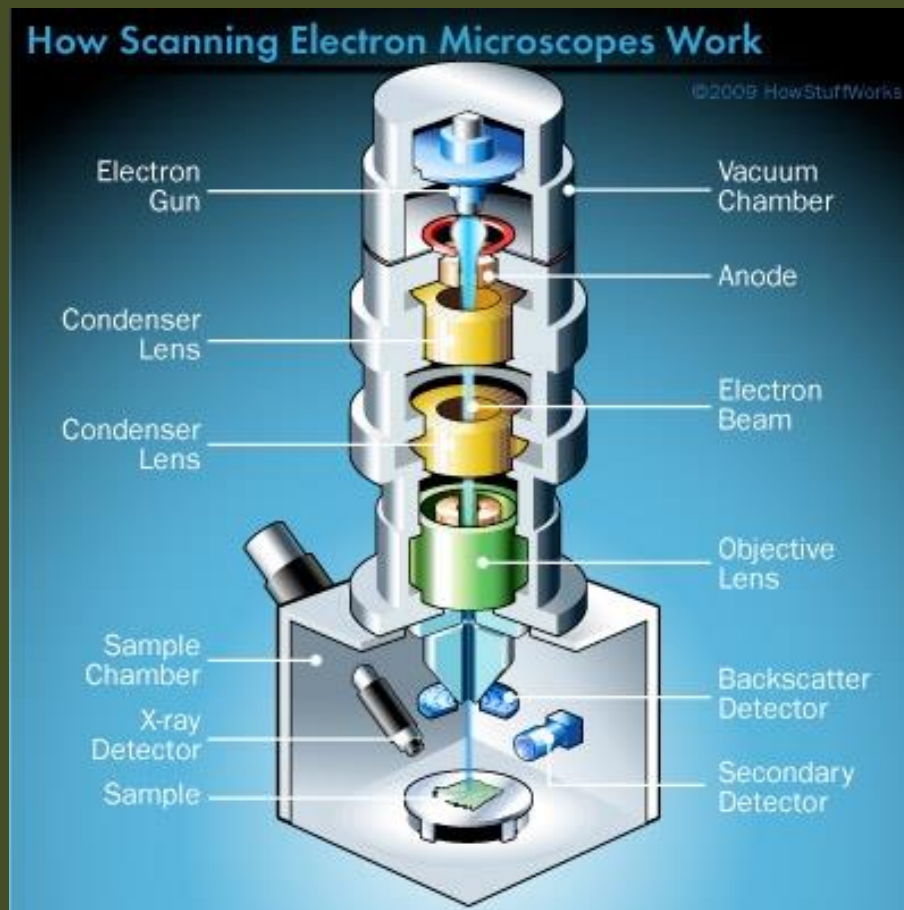
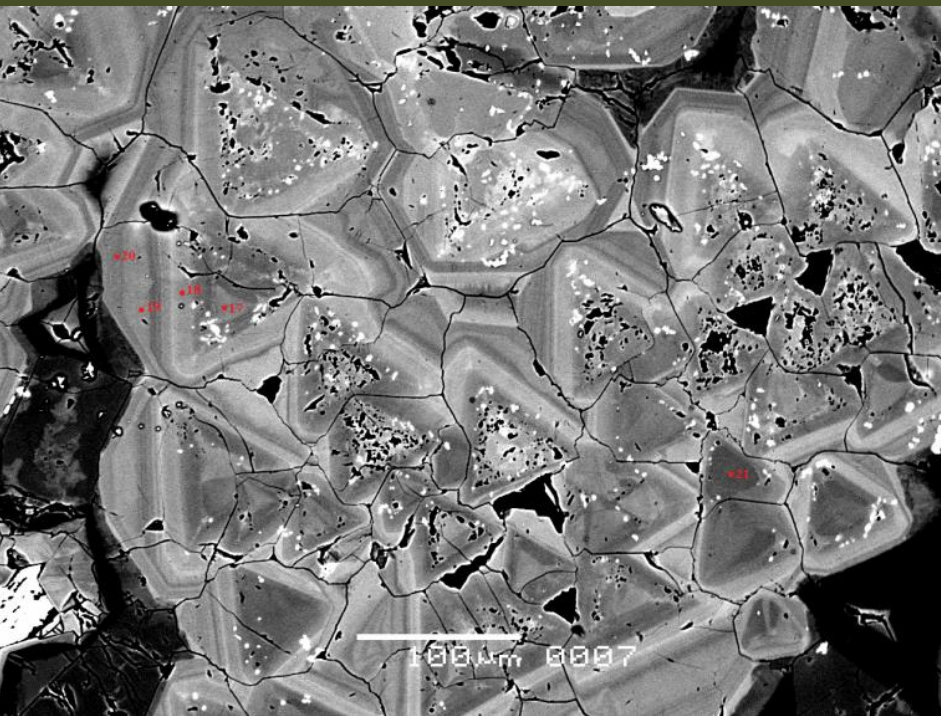


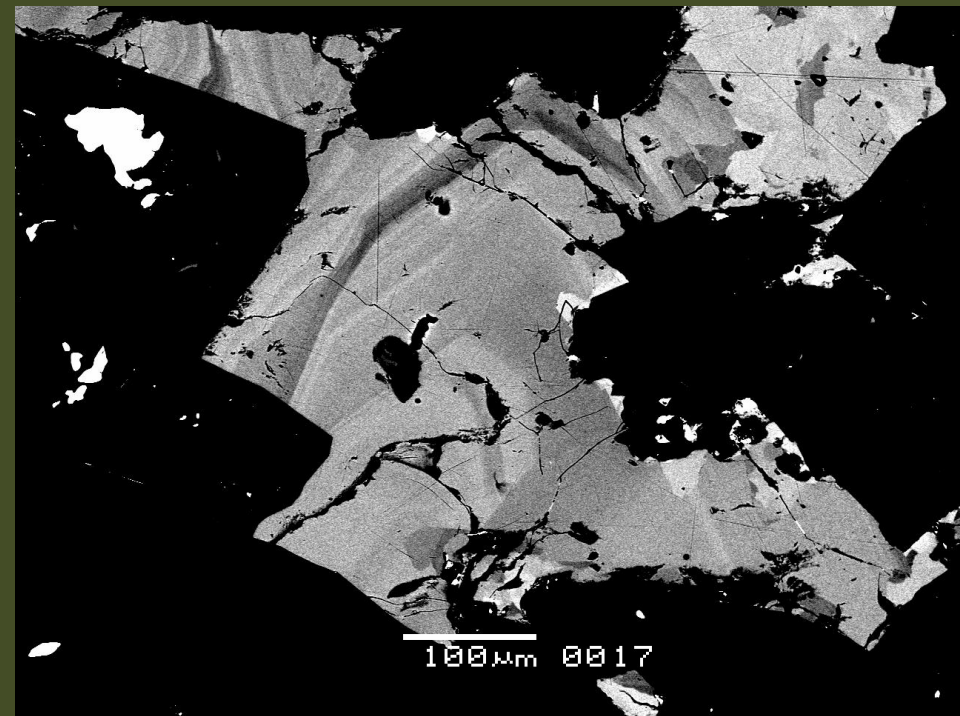
Схема устройства электронного микроскопа

Микроскопические методы

Сканирующий электронный микроскоп



Срастание зональных кристаллов турмалина, фото в отраженных электронах

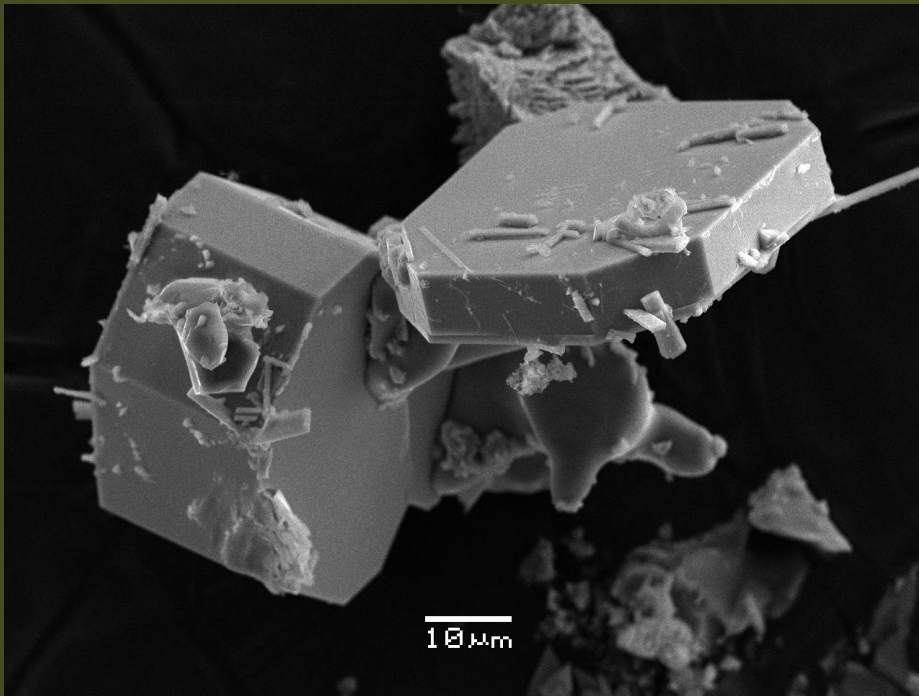


Зональная блеклая руда, фото в отраженных электронах

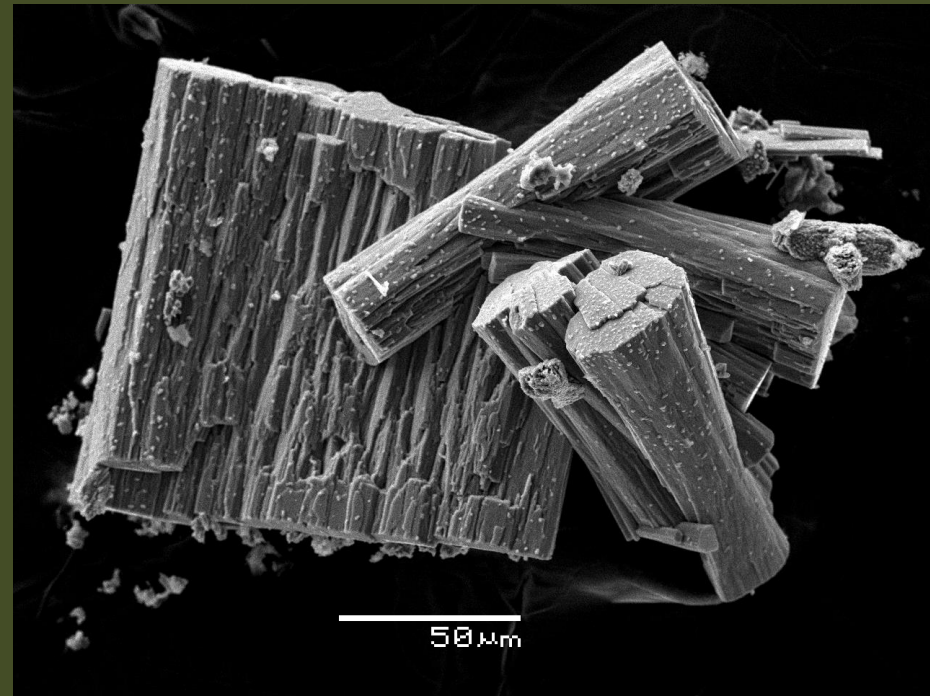
Микроскопические методы

Сканирующий электронный микроскоп

Изображения минералов фумарол вулкана Толбачик во вторичных электронах (фото И.В.Пекова)



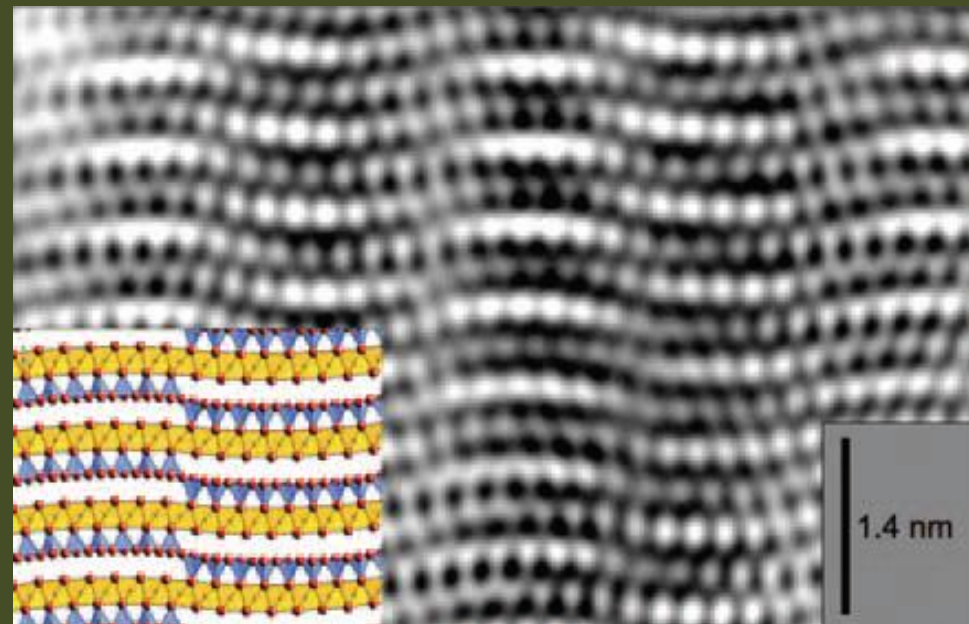
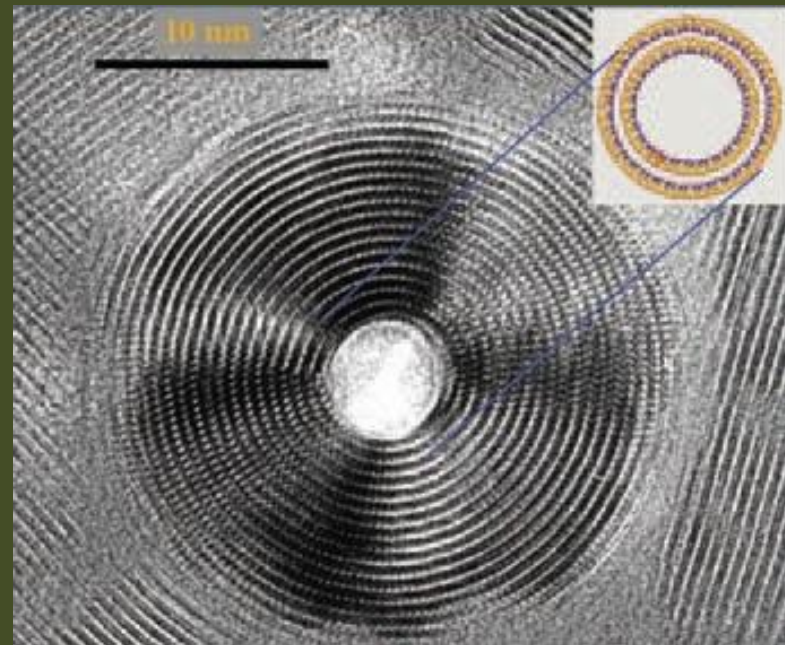
Кристаллы атласовита.
 $\text{KCu}_6\text{Fe}^{3+}\text{BiO}_4(\text{SO}_4)_5\text{Cl}$



Купромолибдит $\text{Cu}_3\text{O}(\text{MoO}_4)_2$

Микроскопические методы Просвечивающий электронный микроскоп

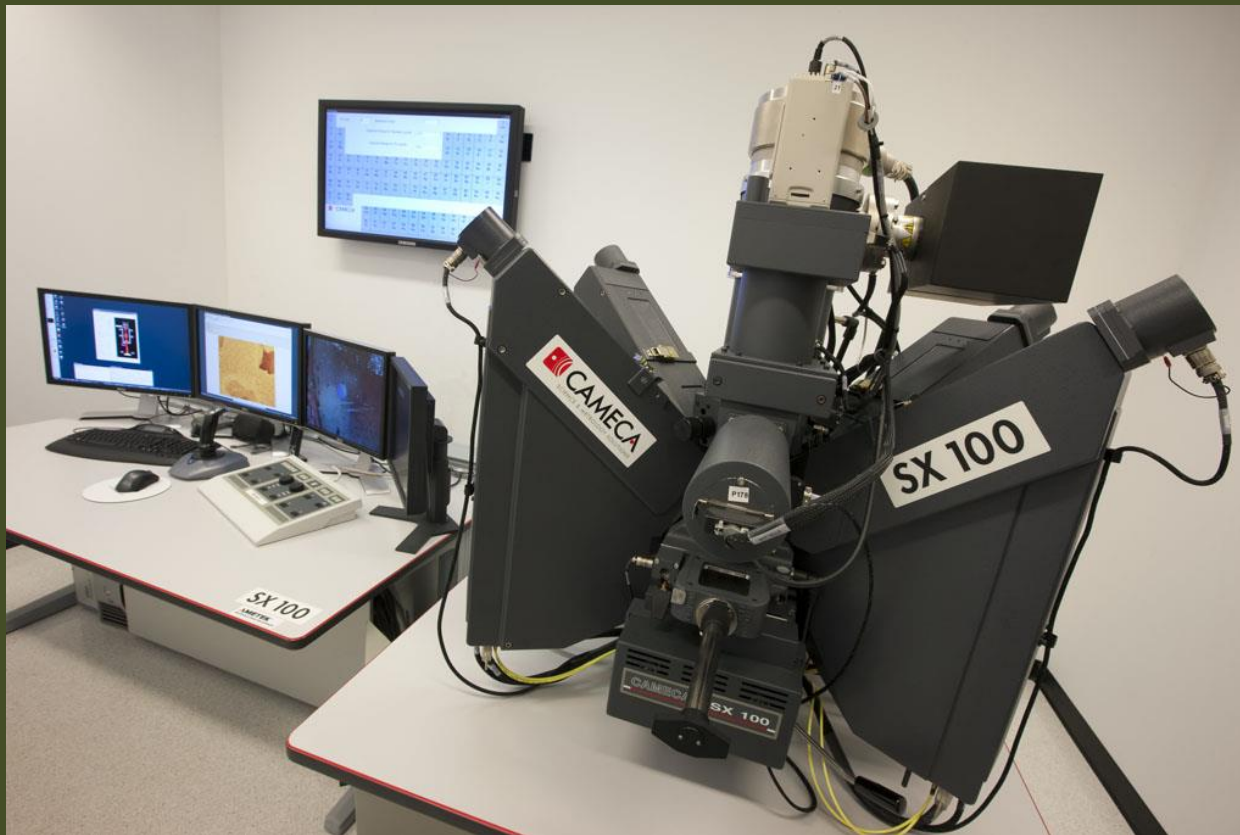
Изображения реальных структур лизардита, хризотила и антигорита, полученные с помощью ПЭМ высокого разрешения



Evans et al., 2013

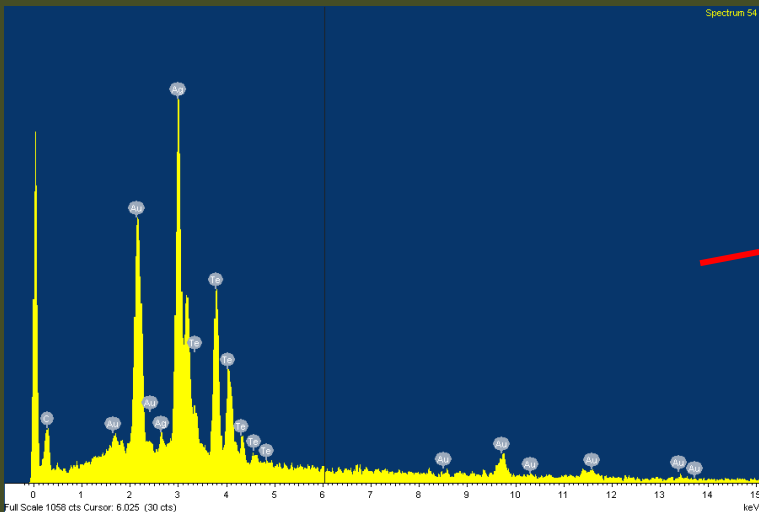
Методы анализа химического состава минералов

Электронно-зондовый рентгено-спектральный микроанализатор (электронный микрозонд)

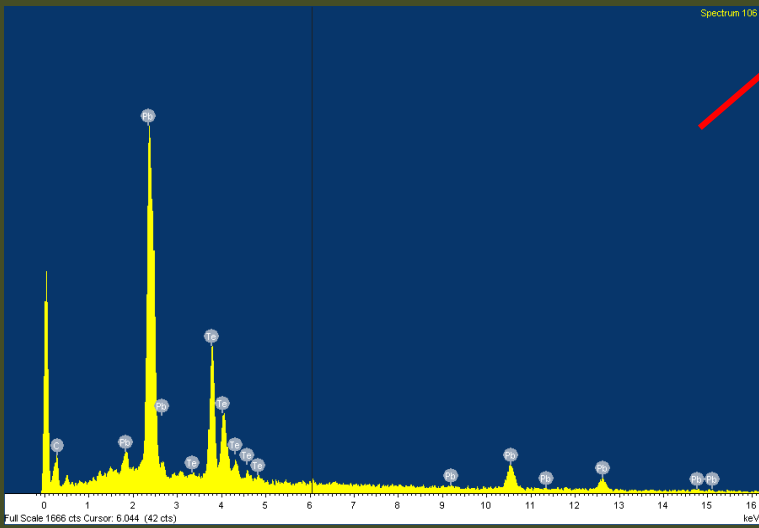


Рентгено-
спектральный
микроанализатор
CAMECA SX-100

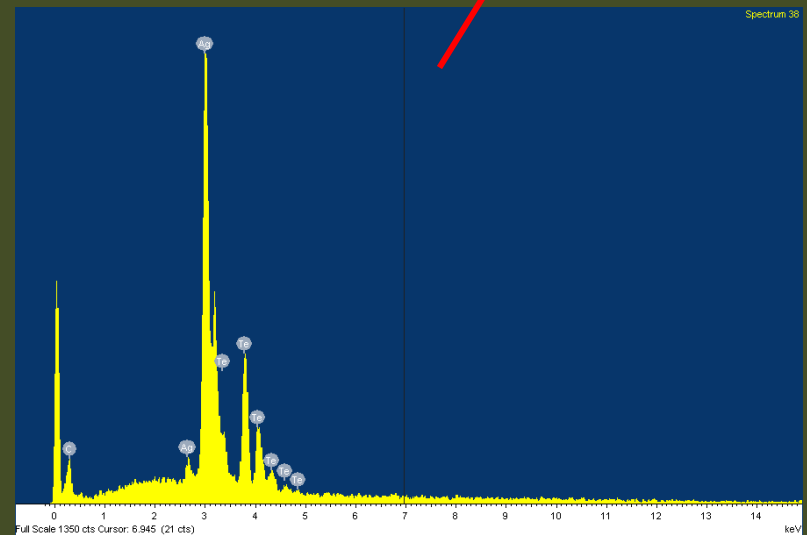
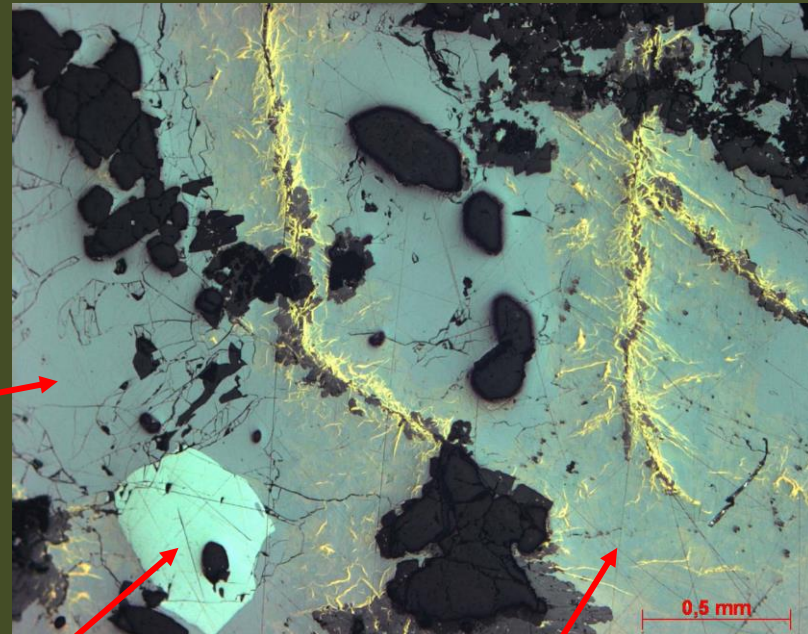
Качественный и количественный анализ на электронном микронзонде



Au 26,73 Ag 43,47 Te 31,78 Ag_3AuTe



Pb 61,33 Te 40,11 PbTe



Ag 61,92 Te 38,74 Ag_2Te

Масс-спектрометрические методы

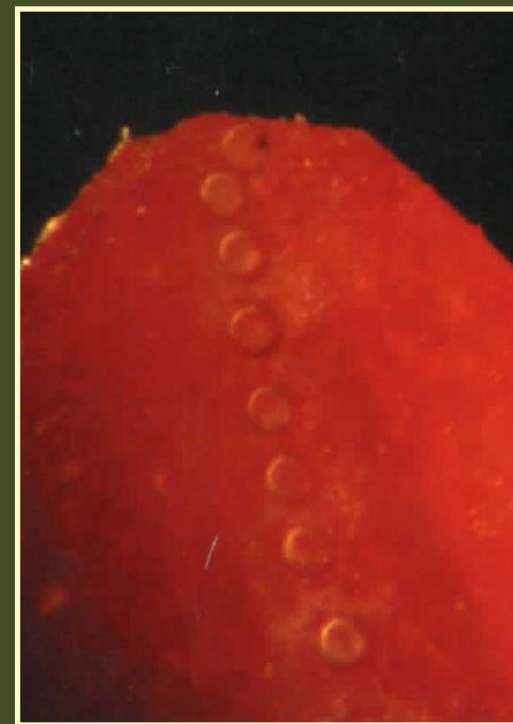
Ионные зонды



Shrimp II (Sensitive High Resolution Ion Micro Probe II) - прецизионный вторично-ионный микрозонд высокого разрешения (ВСЕГЕИ, Санкт-Петербург). Прибор весит порядка *12 тонн* и имеет длину ионного пучка более *7 метров*!

Масс-спектрометрические методы

Методы анализа химического состава минералов с использованием ИСП

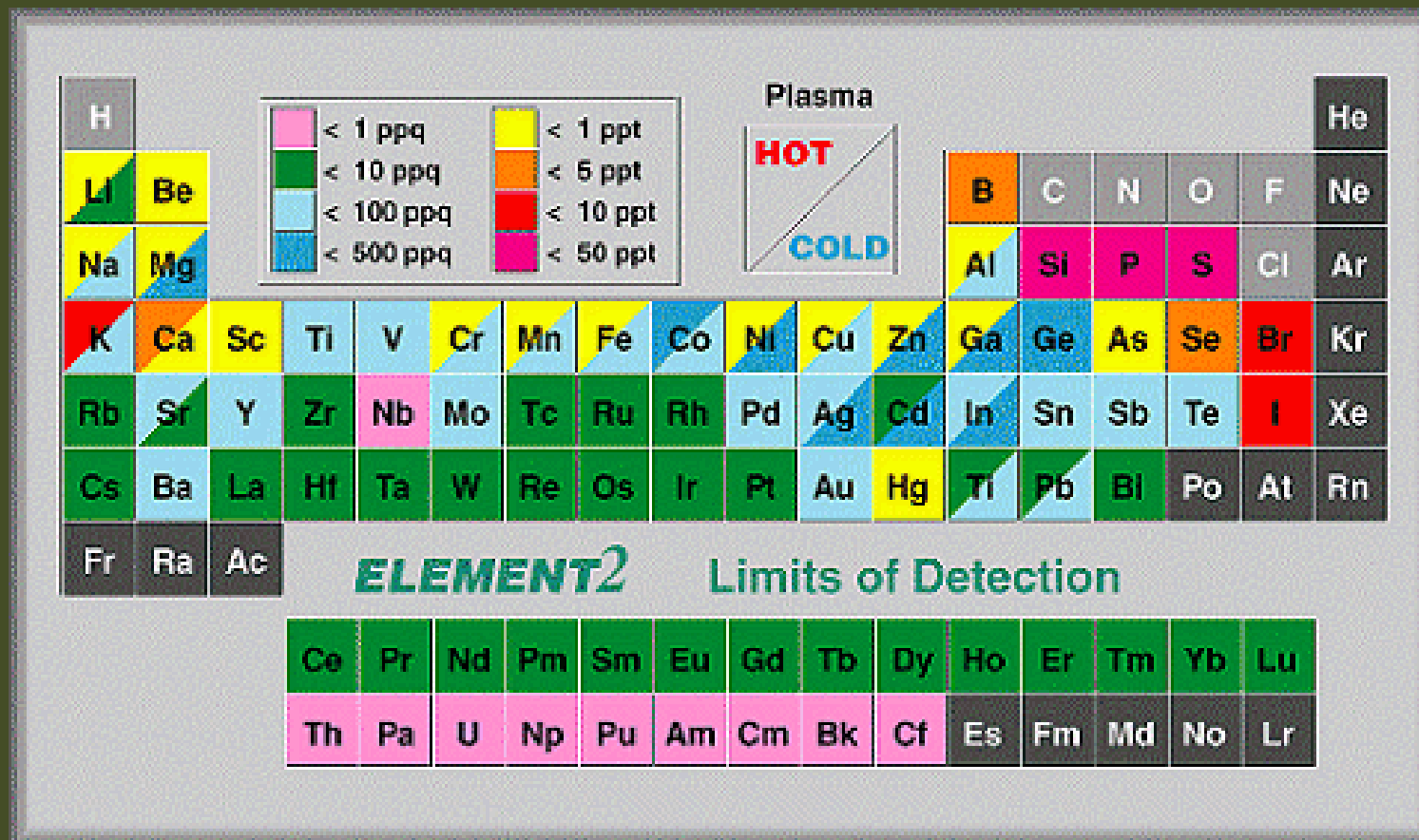


LA-ICP-MS: следы от лазерной абляции на образце корунда

Установка для LA-ICP-MS

Индуктивно-связанная плазма (*inductively coupled plasma, ICP*) – тип газового разряда, возбуждаемого переменным магнитным полем при помощи индукционной катушки. За счет высокой T (более 6000°C) позволяет почти полностью ионизировать вещество.

Пределы обнаружения элементов методом ICP-MS



ppm (parts per million) – 10^{-6}

ppb – 10^{-9}

ppt – 10^{-12}

ppq – 10^{-15}

Правила написания формул минералов

Написание формул минералов

$\text{Na}^{\text{X}}\text{Ca}_2^{\text{VIII}}(\text{Fe}^{2+}_4\text{Fe}^{3+})^{\text{VI}}[\text{Si}_6^{\text{IV}}\text{Al}_2^{\text{IV}}\text{O}_{22}](\text{OH})_2$ –гастингсит

$\text{Ca}_2^{\text{IX}}\text{Ca}_3^{\text{VII}}[\text{PO}_4]_3\text{F}$ - фторапатит

$\text{Ca}[\text{SO}_4]\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ - гипс

- В начале формулы указываются катионы, затем анионы
- Катионы с разной структурной позицией записываются по порядку по мере уменьшения их КЧ
- Элементы в одной позиции записываются в скобках. Если они замещают друг друга, то они записываются через запятую
- После катионов указываются комплексные анионы. Если анионов несколько их располагают в порядке уменьшения коэффициента
- Число молекул кристаллизационной воды указывают в конце формулы

Способы представления составов минералов

- 1) В виде таблиц мас.% оксидов или элементов
- 2) В виде таблиц формул или формул, приводимых в строчку
- 3) В виде миналов
- 4) Графический

Представление в виде миналов

- Составы некоторых минералов для удобства сравнения представляют в виде миналов, т.е. конечных реальных или гипотетических конечных членов изоморфных рядов.
- Оливин состава $\text{Mg}_{1.5}\text{Fe}_{0.5}[\text{SiO}_4]$ можно представить в виде минала форстерита в количестве 75% и минала фаялита 25%
- Карбонат группы доломита состава $\text{Ca}(\text{Mg}_{0.5}\text{Fe}_{0.25}\text{Mn}_{0.25})(\text{CO}_3)_2$ можно записать в виде минала доломита 50%, анкерита 25% и кутнагорита 25%
- Часто в виде миналов записывают составы пироксенов, гранатов, амфиболов и т.д.

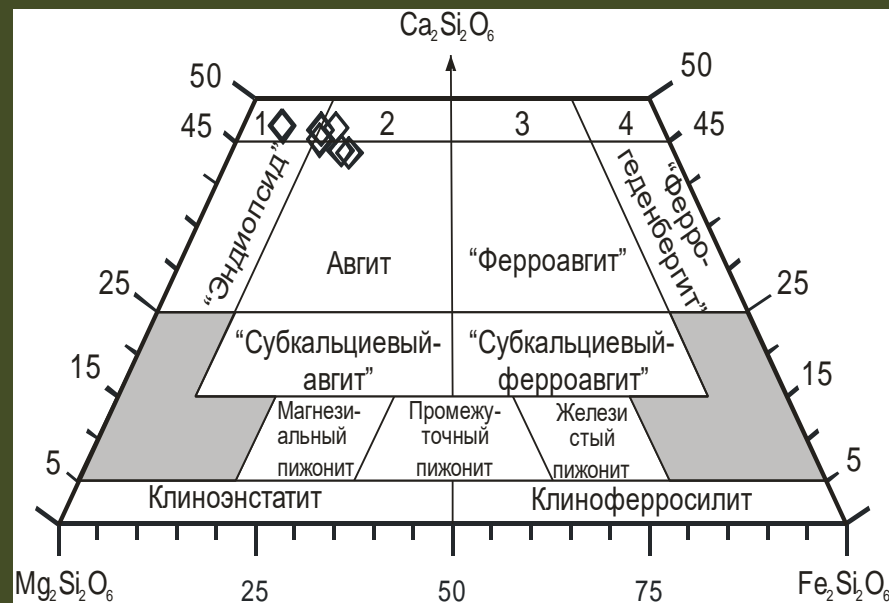
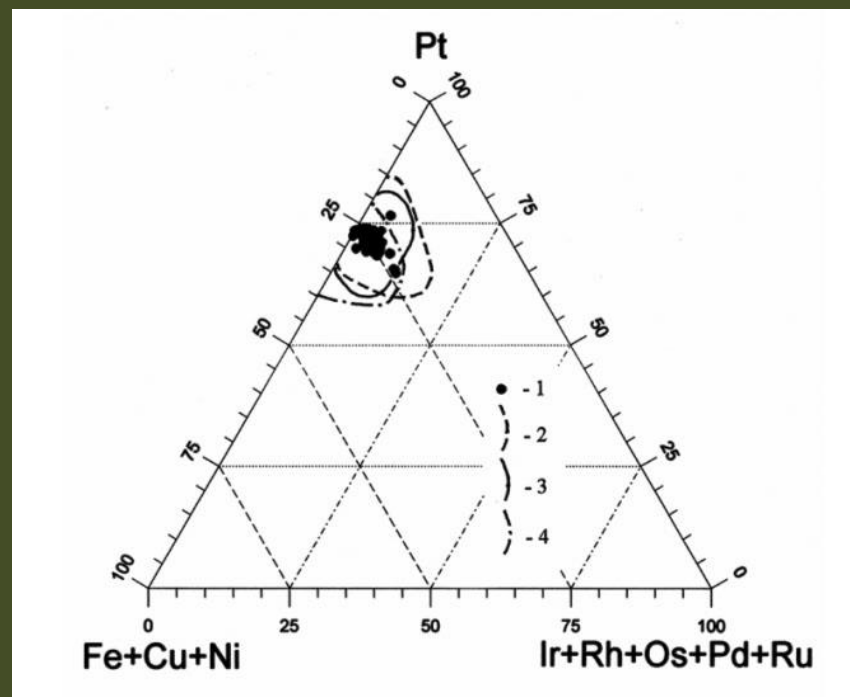
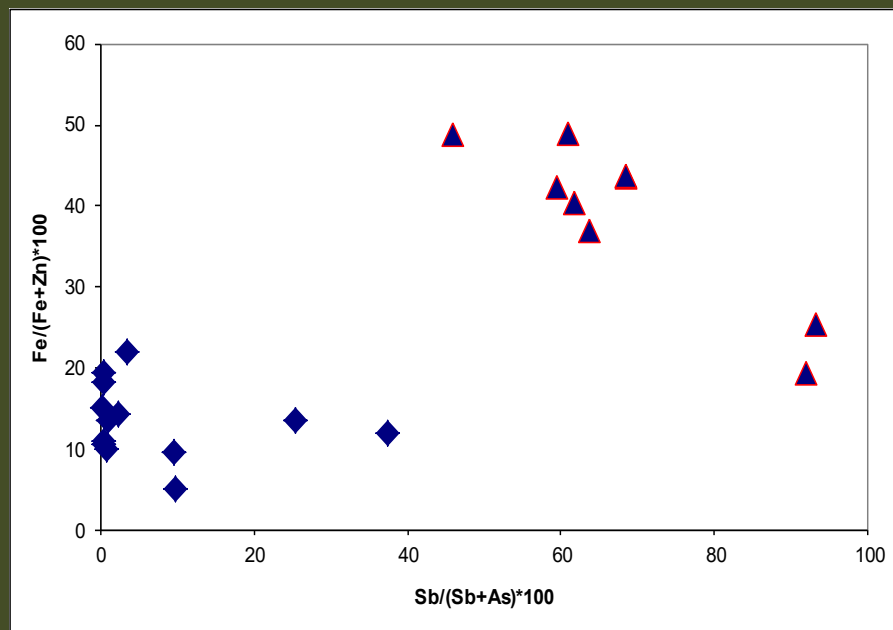
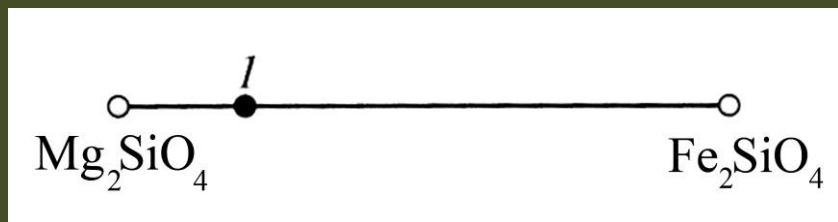
Графические способы представления

Применяют обычно для обобщения результатов химического анализа минералов, выявления трендов составов, выявления различий в составе одного и того же минерала, сформированного на разных стадиях развития месторождения

- 1) Отрезок прямой - для наиболее простых систем
- 2) Бинарный график – для отражения соотношения каких либо элементов в минерале или их отношений
- 3) Треугольные диаграммы – для сложных систем
- 4) Трапеция (по сути часть треугольника) – для пироксенов
- 5) Тетраэдр

Наиболее часто используют первые 4, поскольку тетраэдр труден для изображения и его всегда можно разложить на 4 треугольника

Графические способы отображения химического состава



Графические способы отображения химического состава

