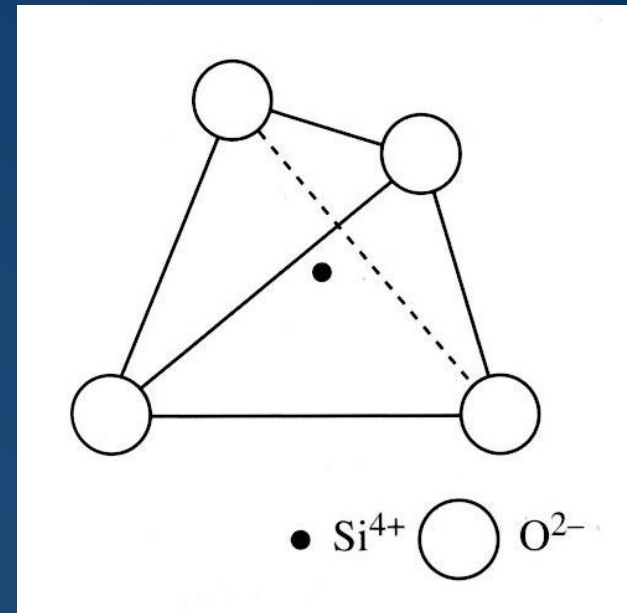


# Минералы кремнезема ( $\text{SiO}_2$ )

- $\alpha$ -кварц
- $\beta$ -кварц
- Тридимит ( $\alpha$ - и  $\beta$ -модификации)
- Крестобалит ( $\alpha$ - и  $\beta$ -модификации)
- Моганит
- Коэсит
- *Стишовит*
- *Сейфертит*

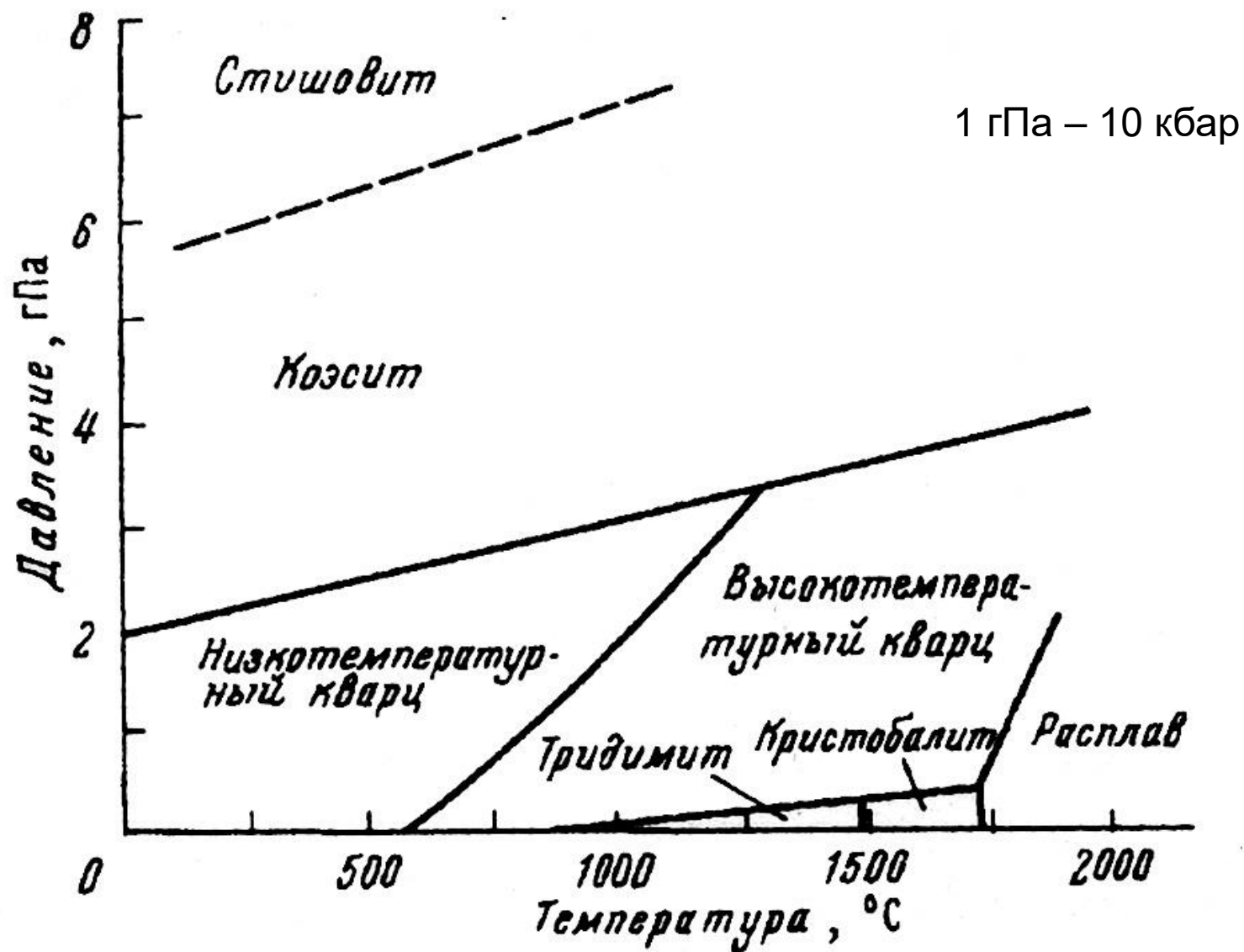


Основная структурная единица –  $(\text{SiO}_4)$ -тетраэдр

Тетраэдры соединяются вершинами, образуя бесконечный трехмерный каркас.

*Исключениями являются стишовит и сейфертит, в которых Si находится в октаэдрической позиции.*

# Минералы кремнезема ( $\text{SiO}_2$ )

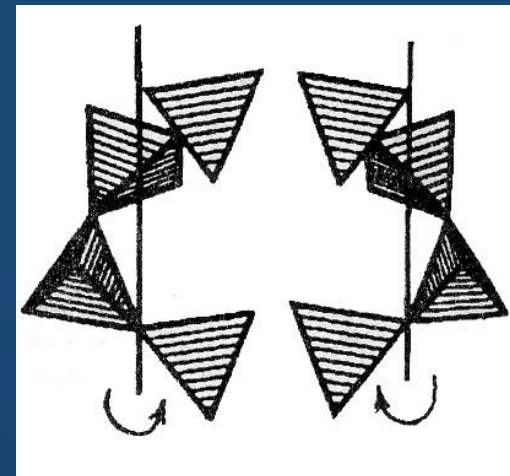
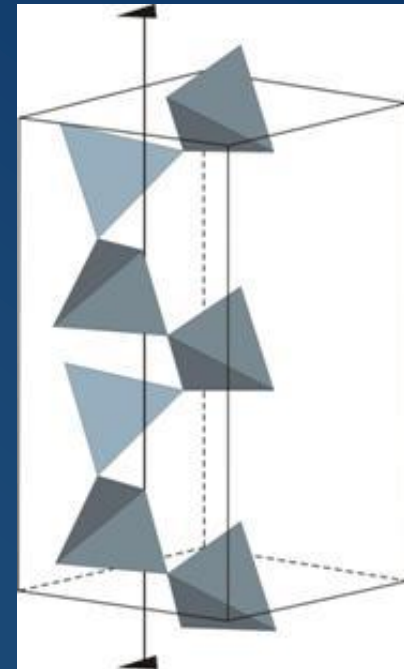
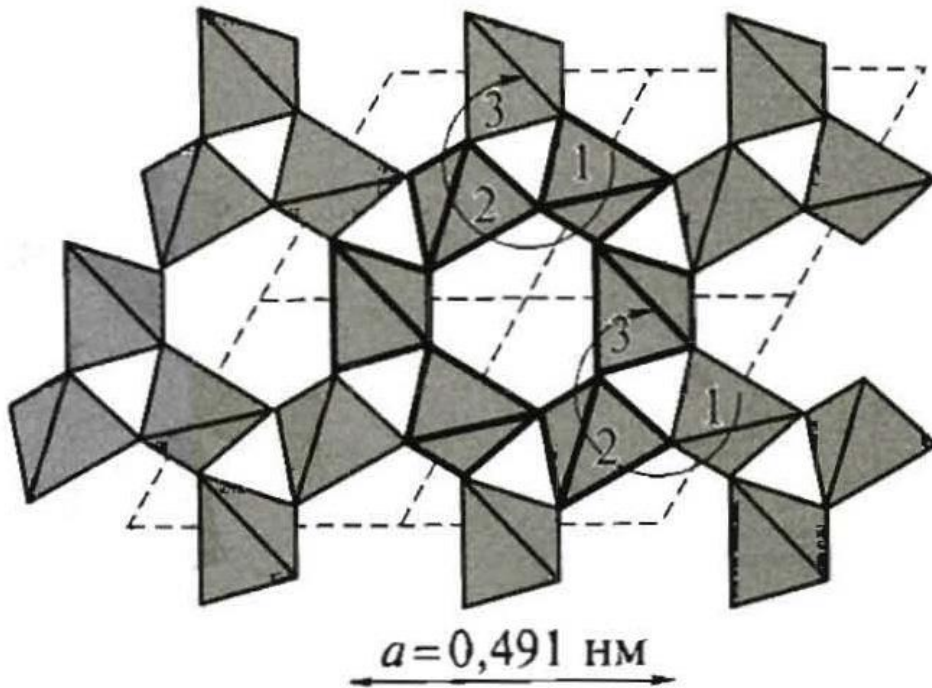


# α-кварц

- Слагает около 12 % земной коры, является вторым по распространению после полевых шпатов.
- Большое количество разновидностей (по цвету и морфологии выделений). *Известно более 50 минералогических, ювелирных и коммерческих названий, относящихся к кварцу.*
- Известен человеку с каменного века (возможно и раньше).
- На сегодняшний день используется в самых различных сферах деятельности человека.

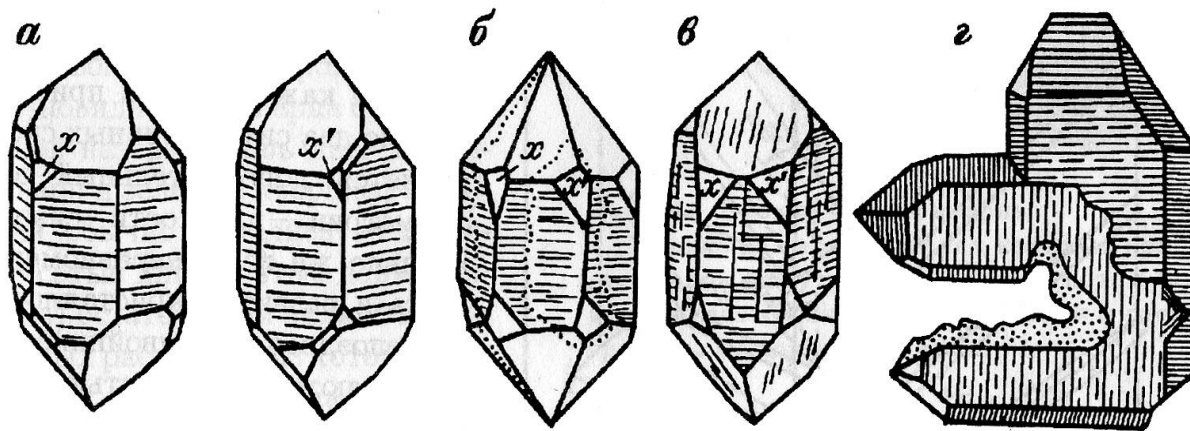
# Кристаллическая структура $\alpha$ -кварца

$\alpha$ -кварц (низкотемпературный, правый) тетраэдры 1,2,3 находятся на разных уровнях



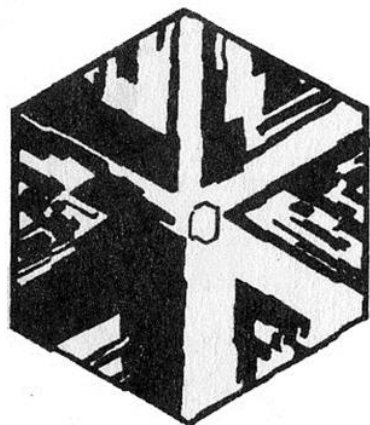


# Двойникование $\alpha$ -кварца



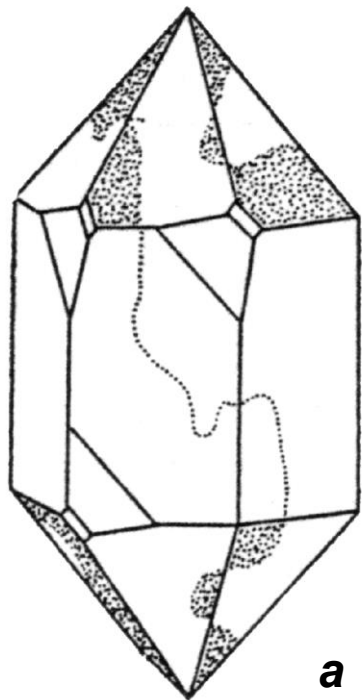
Двойникование кварца.

*a* — левый и правый кристаллы и двойники: *б* — дофине́йский, *в* — бразильский, *г* — японский.



Фигура травления  
плавиковой кислотой  
бразильского двойника  
кварца

# Двойникование $\alpha$ -кварца



*a*



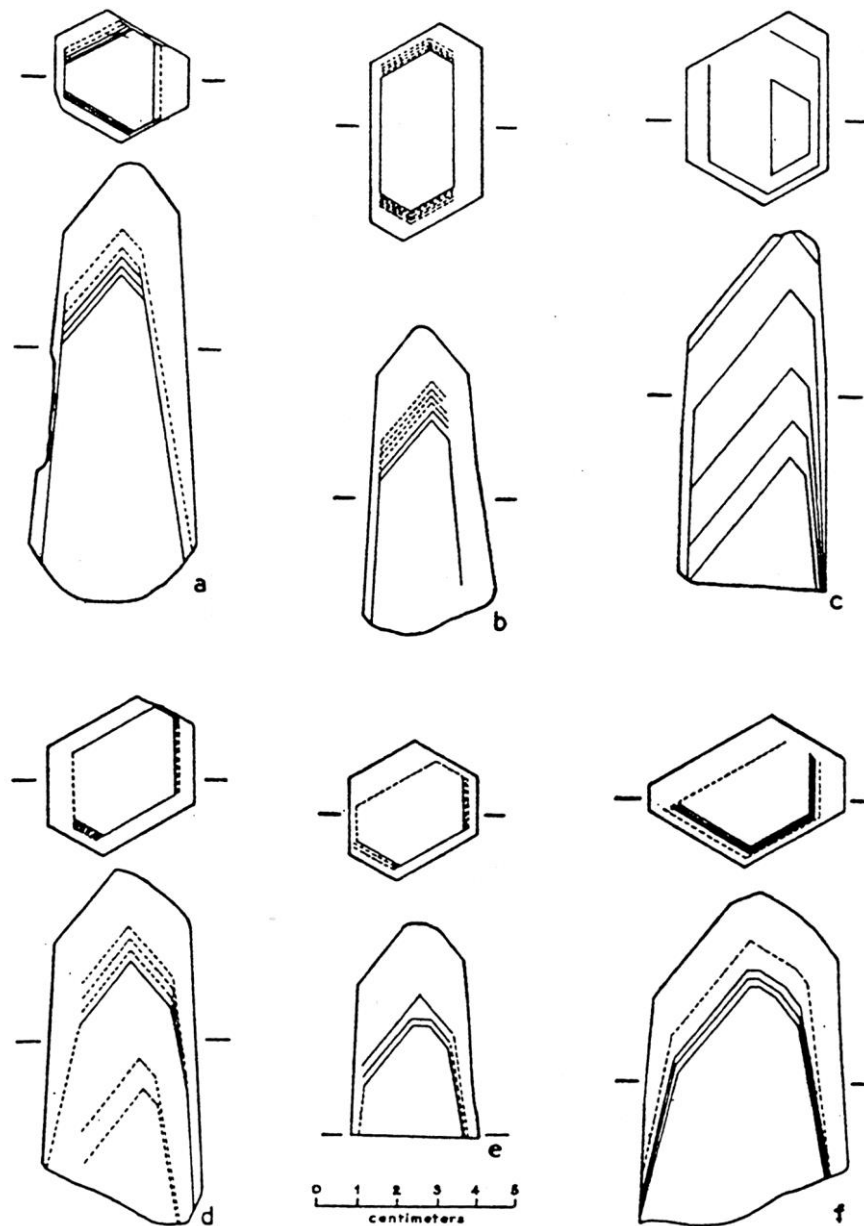
*б*



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

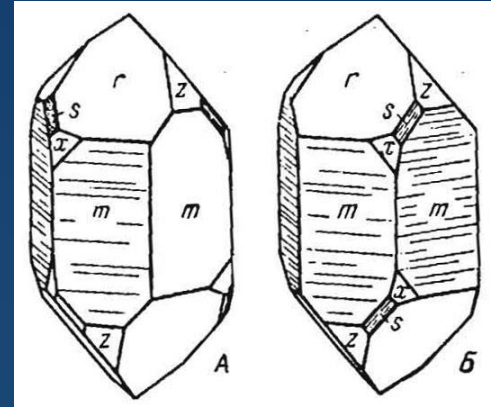
Морфология  
высокотемпературного  
и низкотемпературного  
 $\alpha$ -кварца

Неоднородное  
строение кристаллов —  
зональность,  
секториальность.





# Неоднородное строение кристаллов кварца



# Химический состав $\alpha$ -кварца

Состав минерал близок теоретической формуле  $\text{SiO}_2$

*Изовалентный изоморфизм*

$\text{Si}^{4+} \rightarrow \text{Ge}^{4+}$  (до первых ppm),  $\text{Si}^{4+} \rightarrow \text{Ti}^{4+}$  (до десятков ppm)

*Гетеровалентный изоморфизм внедрения по схеме*

$\text{Si}^{4+} - \text{Me}^{3+}$  (в тетраэдре) +  $\text{Me}^+$  (в пустотах каркаса).

$\text{Me}^{3+} - \text{Al}^{3+}$  (самая типичная примесь, присутствует почти всегда в концентрации 30-300 ppm),  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Ga}^{3+}$

$\text{Me}^+ - \underline{\text{Li}^+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{H}^+$

Небольшой размер пустот каркаса объясняет крайнюю ограниченность гетеровалентного изоморфизма

Характерны вакансии Si ( $V_{\text{si}}$ ) и O ( $V_{\text{o}}$ )

# Цветные разновидности кварца

Природа окраски различна:

- *идиохроматическая*
- *аллохроматическая*



Аметист



# Цветные разновидности кварца



Морион



Цитрин



Дымчатый кварц (rauchтопаз)

# Цветные разновидности кварца

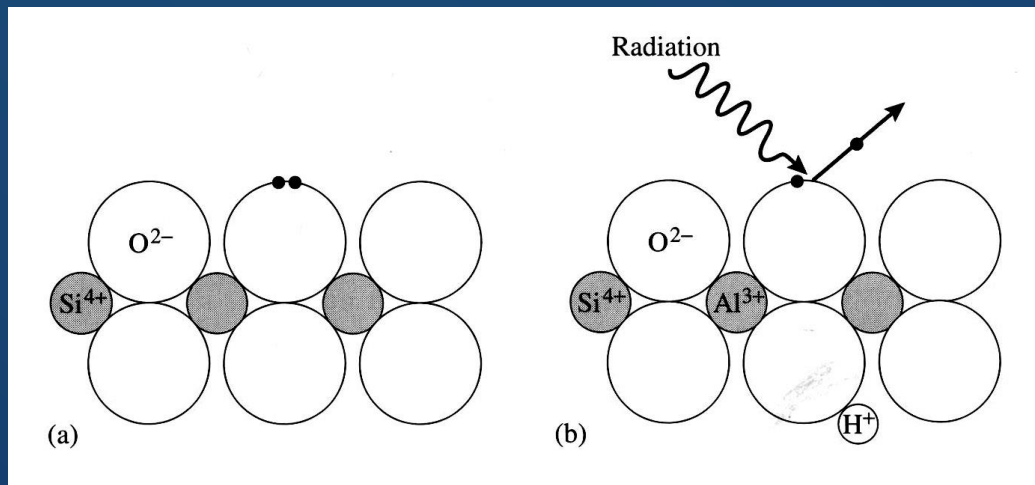
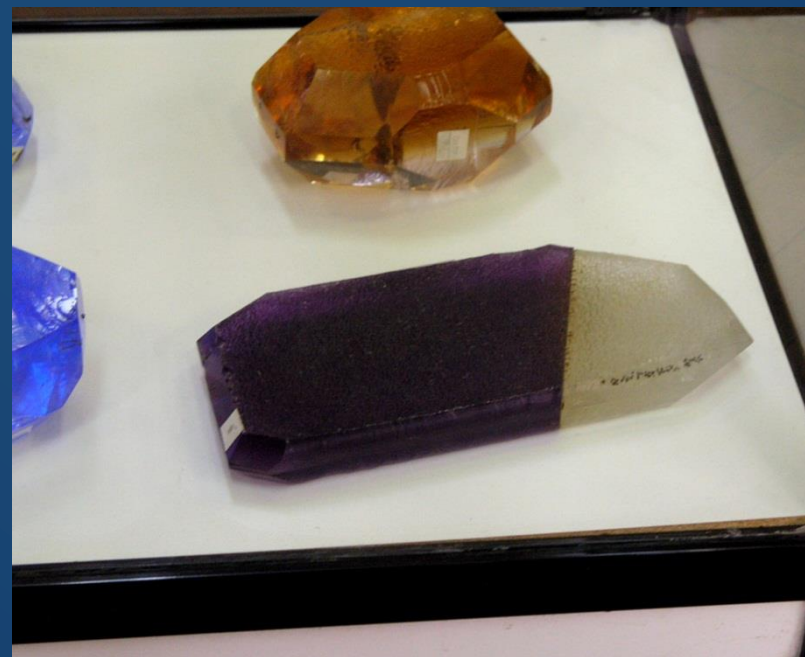


Схема возникновения электронно-дырочных центров в кварце

Частично облученный  $\gamma$ -квантами  
кристалл синтетического кварца  
(источник  $\text{Co}^{60}$ )



Кристалл горного хрусталя после  
облучения гамма-квантами  
(источник  $\text{Co}^{60}$ ) [www.webmineral.ru](http://www.webmineral.ru)





# Цветные разновидности кварца

## *Аллохроматическая окраска кварца*



Кварц с  
включениями  
геденбергита.

о. Серифос,  
Греция.

[http://geo.web.ru  
/druza](http://geo.web.ru/druza)

# Цветные разновидности кварца

## *Аллохроматическая окраска кварца*



Кварц с включениями гематита. 2-ой Советский р-к, Дальнегорск, Приморье, Россия. Мин. музей им.А.Е. Ферсмана. <http://geo.web.ru/druza>



# Скрытокристаллические разновидности кварца

*Халцедон* – скрытокристаллическая плотная разновидность кварца, обладающая волокнистым строением. Волокна вытянуты вдоль оси  $L_2$ .

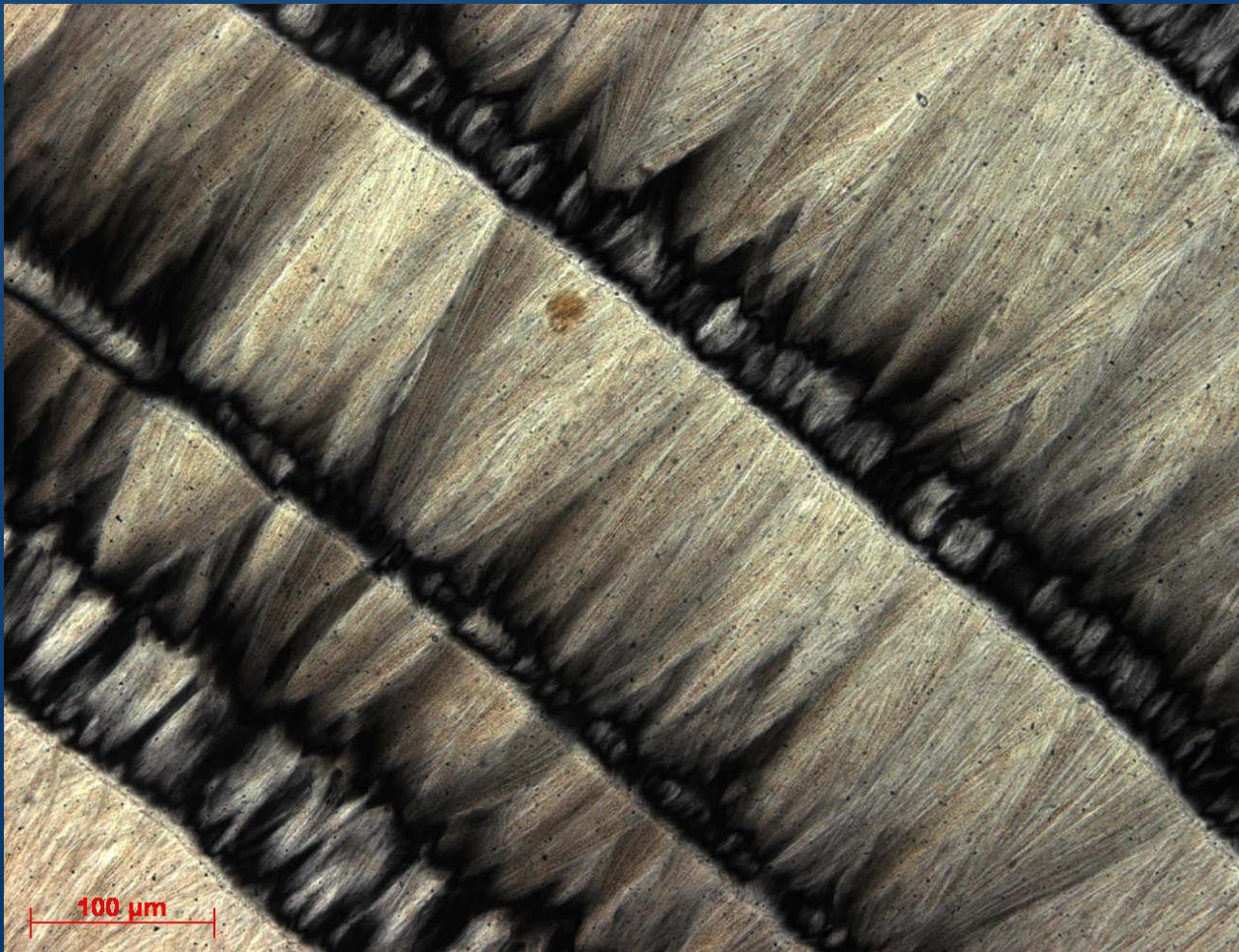
*Кварцин* – скрытокристаллическая плотная разновидность кварца, обладающая волокнистым строением. Волокна вытянуты вдоль оси  $L_3$ .

Для данных разновидностей часто характерна значительная микропористость.

Состав –  $\text{SiO}_2$  от 90 до 99 %

Примеси  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{NiO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{OH}$ .

# Халцедон



Волокна халцедона имеют, как правило, длину 20-40 мкм, при толщине 2-3 мкм.

До 6500 – 7000 слоев на 1 см!

Волокна халцедона активно расщепляются. Это связано с одной стороны с быстрой кристаллизацией, с другой стороны с замещением  $O^{2-}$  в тетраэдрах на  $(OH)^-$ .



# Халцедон



Ступино,  
Подмосковье



Голутвин,  
Подмосковье

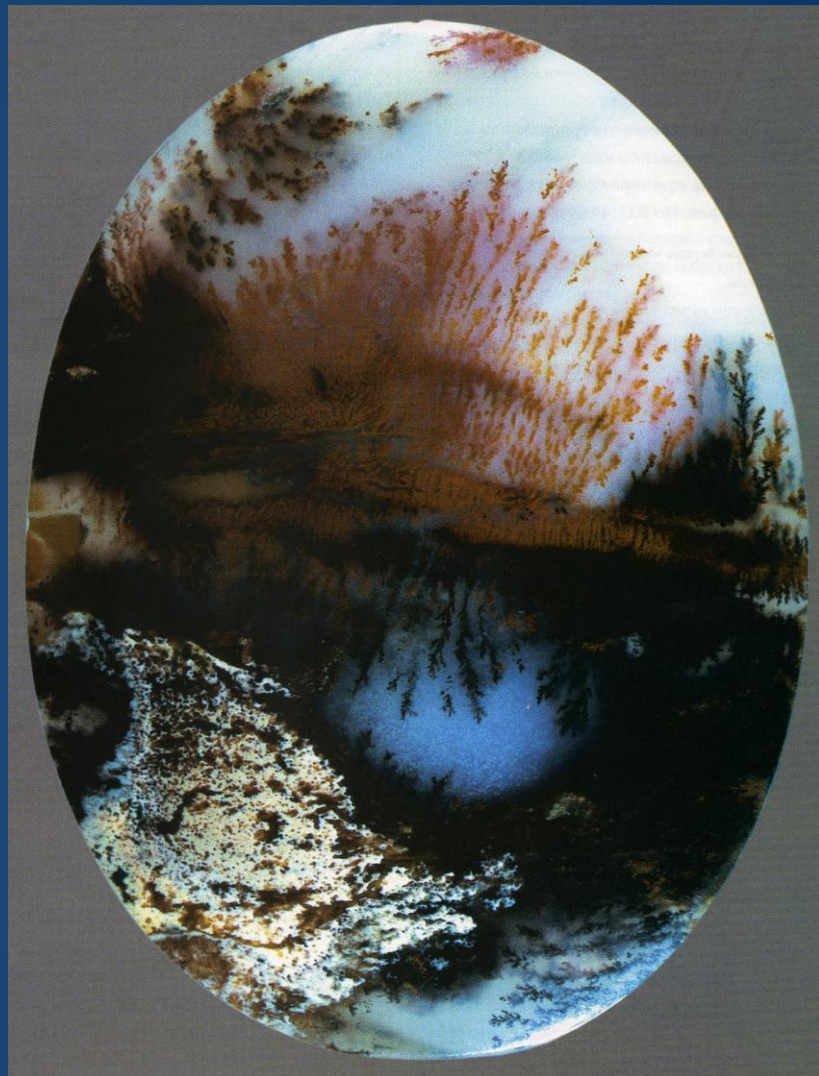
# Цветные разновидности халцедона

- Сердолик
- Карнеол
- Хризопраз
- Сапфирин (ювелирно-поделочная разновидность халцедона; не путать с минеральным видом сапфирином – цепочечным алюмосиликатом с составом  $\text{Mg}_4(\text{Mg}_3\text{Al}_9)[\text{Si}_3\text{Al}_9\text{O}_{36}]\text{O}_4$ )





# Рисунчатый халцедон - агат



# Образование кварца

Кварц – полигенный минерал

- Магматические образования  
(средние, кислые породы)
- Гранитные пегматиты  
(малоглубинные – с полостями)





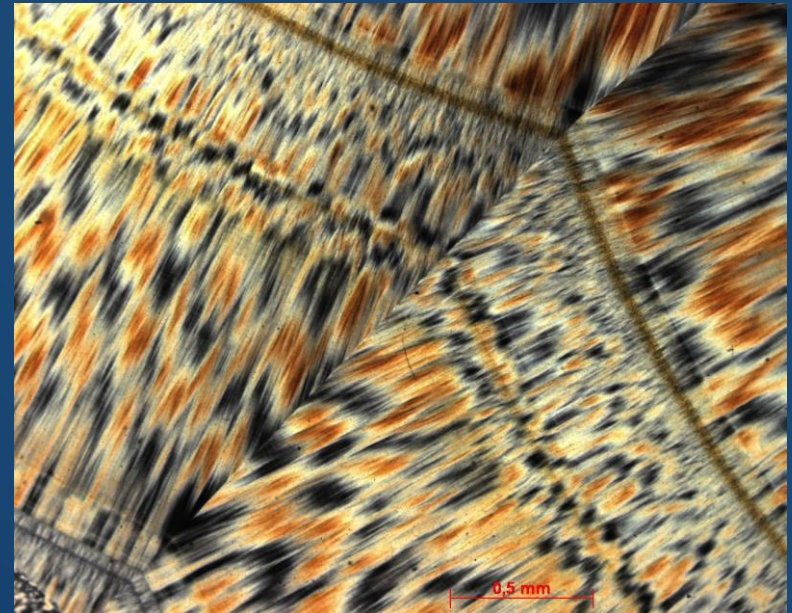
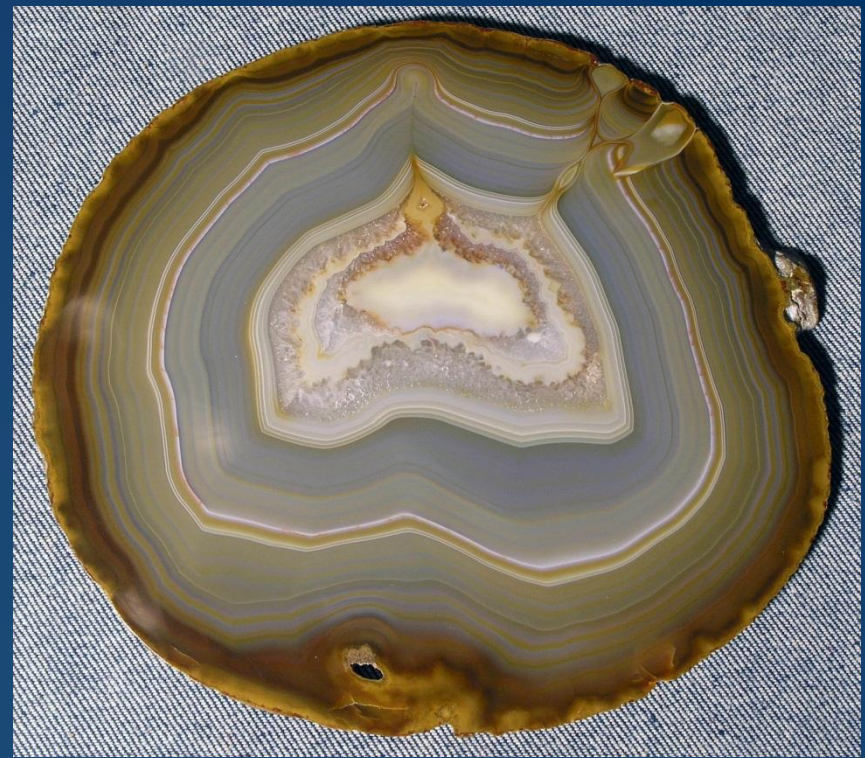
# Образование кварца

*SiO<sub>2</sub> – легко растворяется и переносится водными кислыми, нейтральными или щелочными растворами. Следствие – кварц типичный минерал метасоматитов, гидротермальных жил и метаморфических пород.*

- Гидротермально-метасоматические образования  
грейзены, березиты, вторичные кварциты  
жильные образования (жила Пфальц – длина около 150 км при мощности окварцованной зоны 100м).
- Гипергенные образования.
- Метаморфические породы (цеолитовая фация – образование агатов при T 120 – 200<sup>0</sup>C, фации зеленых сланцев – яшмы, альпийские жилы).

# Низкоградный метаморфизм

Выделение халцедона происходит при значительном пересыщении растворов. При низком пересыщении отлагается кварц.





# Низкоградный метаморфизм





# Низкоградный метаморфизм



# Жилы альпийского типа

Рассматриваются как продукт переотложения в трещинах материала вмещающих г. п. гидротермальными растворами связанными с региональным метаморфизмом. Жилы выполняют отдельные трещины и системы трещин гидроразрыва среди метаморфитов которые испытывают медленное воздымание. Минеральный состав тесно связан с составом вмещающих г. п.



Друза кварца, вес более 300кг, цена более 1 000 000 евро



# Использование кварца

*Производство кремния*

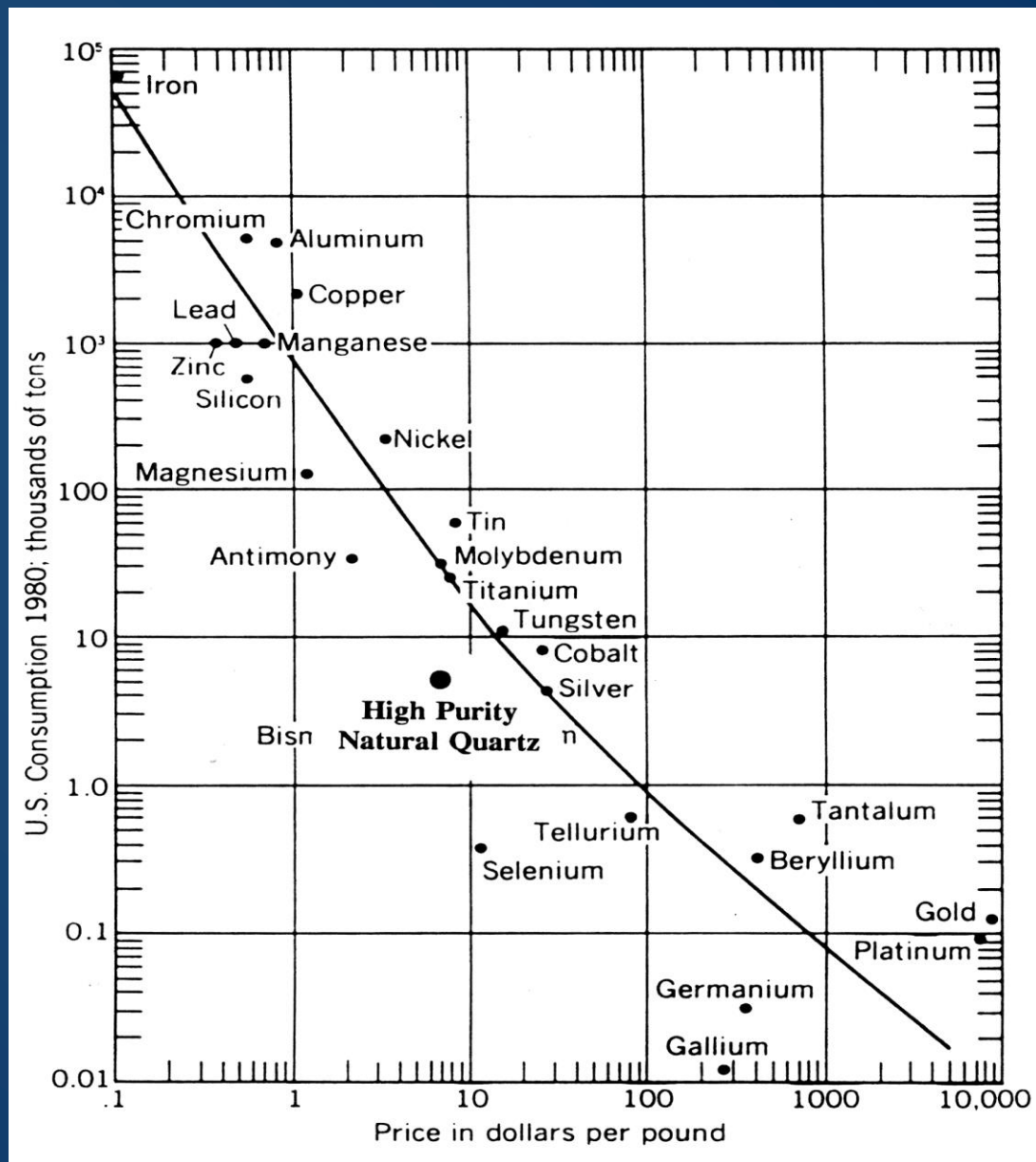
*Производство стекла*

*Производство  
кварцевого стекла  
(лампы, химическая  
посуда)*

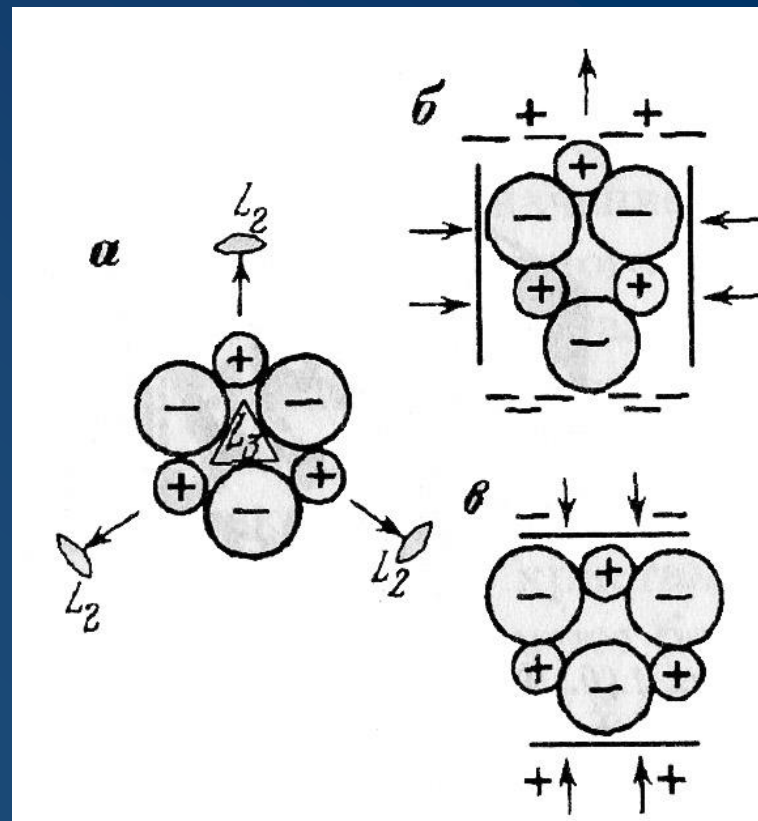
*Радиоэлектроника*

*Опоры в различных  
механических приборах,  
ступки*

*Ювелирная  
промышленность*



Кварц — пьезоэлектрик  
Пьезоэлектрические  
свойства максимально  
проявляются вдоль  $L_2$



*Кварцевые часы*

(кварцевые стабилизаторы частот обеспечивающие  
высокую точность хода)

*Радиоэлектроника* (стабилизаторы частот,  
фильтры частот)

*Гидроакустика* (приемники звуковых колебаний в  
воде)

# Синтез кварца

На сегодняшний день  
для нужд  
промышленности  
используют как  
природный  
(Бразилия), так и  
синтетический кварц.

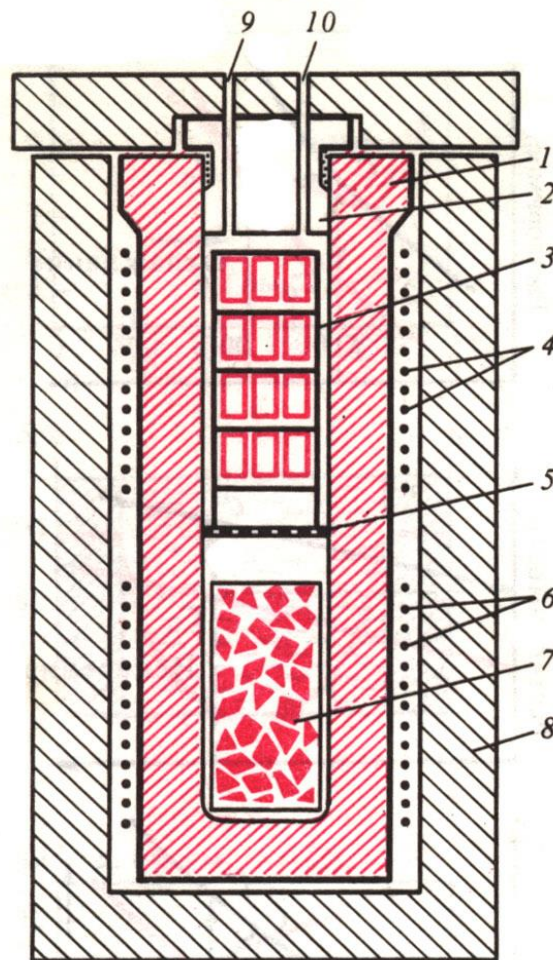


Схема автоклава для выращивания кристаллов кварца и его окрашенных разновидностей в гидротермальных растворах.

1 — корпус автоклава; 2 — крышка; 3 — рамка с затравочными пластинками; 4 — верхний нагреватель; 5 — перегородка с отверстиями (диафрагма); 6 — нижний нагреватель; 7 — контейнер с шихтой; 8 — теплоизоляция; 9 — ввод для термозлемента; 10 — ввод для манометра



# ЭПР-датирования кварца

Для надежного определения возраста молодых геологических объектов эффективен метод датирования кварца с использованием ЭПР, поскольку он обладает уникальной возможностью определять возраст образцов в интервале от десятков тысяч до первых миллионов лет.

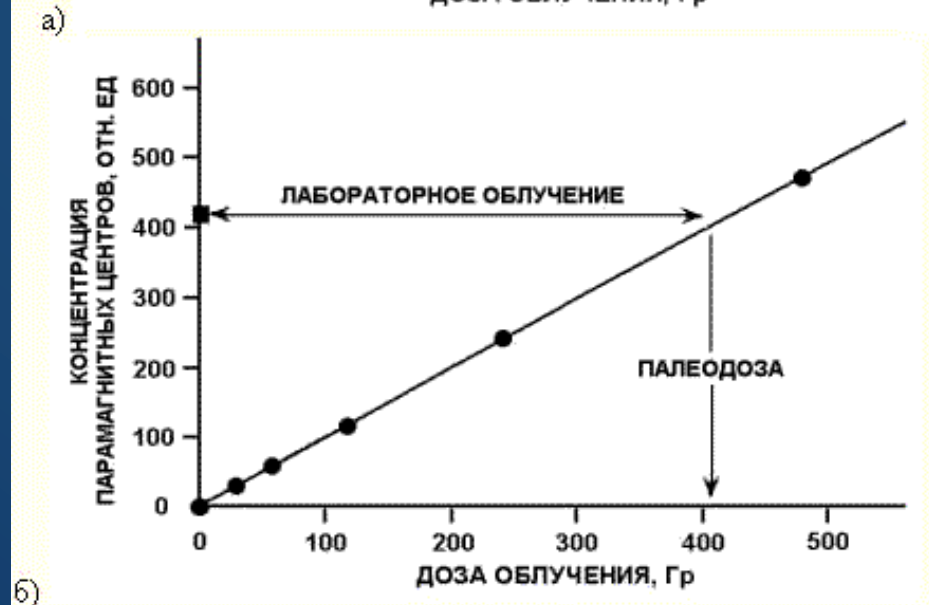
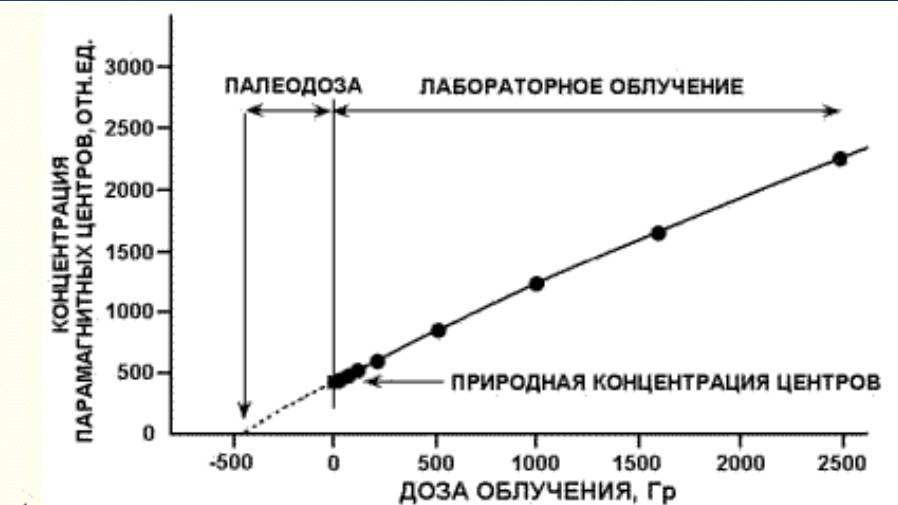
Для данных возрастов практически неприменимы методы радиоизотопного датирования, в том числе радиоуглеродного.

# ЭПР-датирования кварца

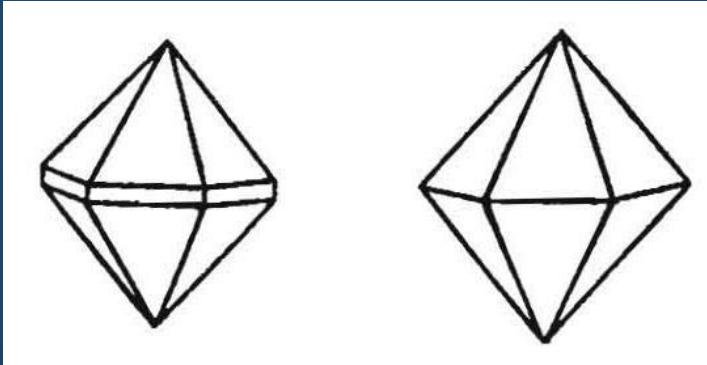
$t = \text{палеодоза} / \text{радиационный фон}$

Палеодоза  
определяется  
методами  
добавочных доз  
и регенерации.

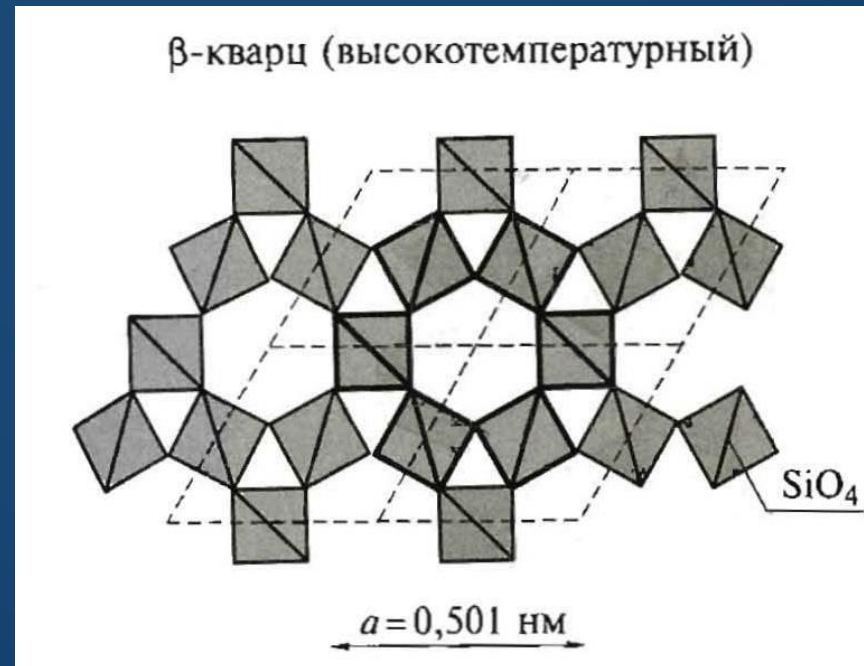
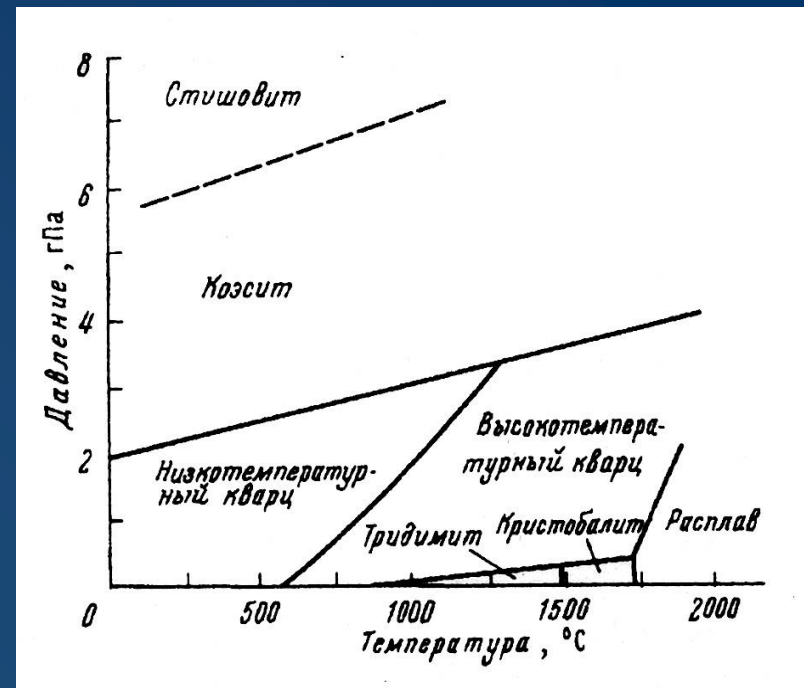
Данные Шабалина Р.В.



# β-кварц, гекс.

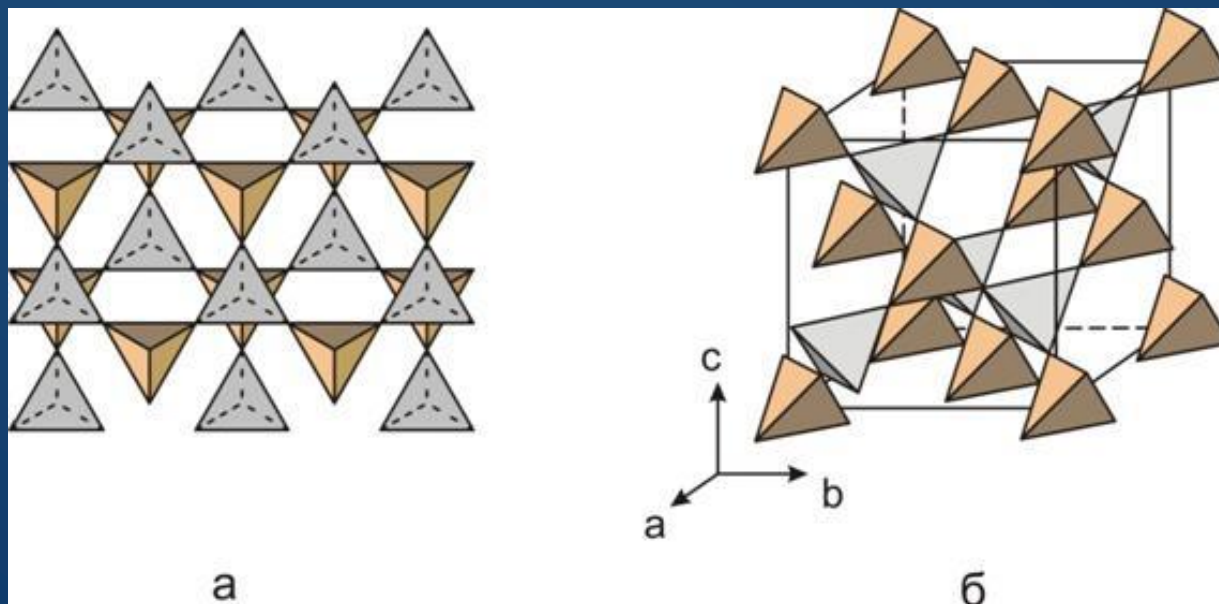


Параморфозы α-кварца по β-кварцу. Вкрапленники в риолитах.





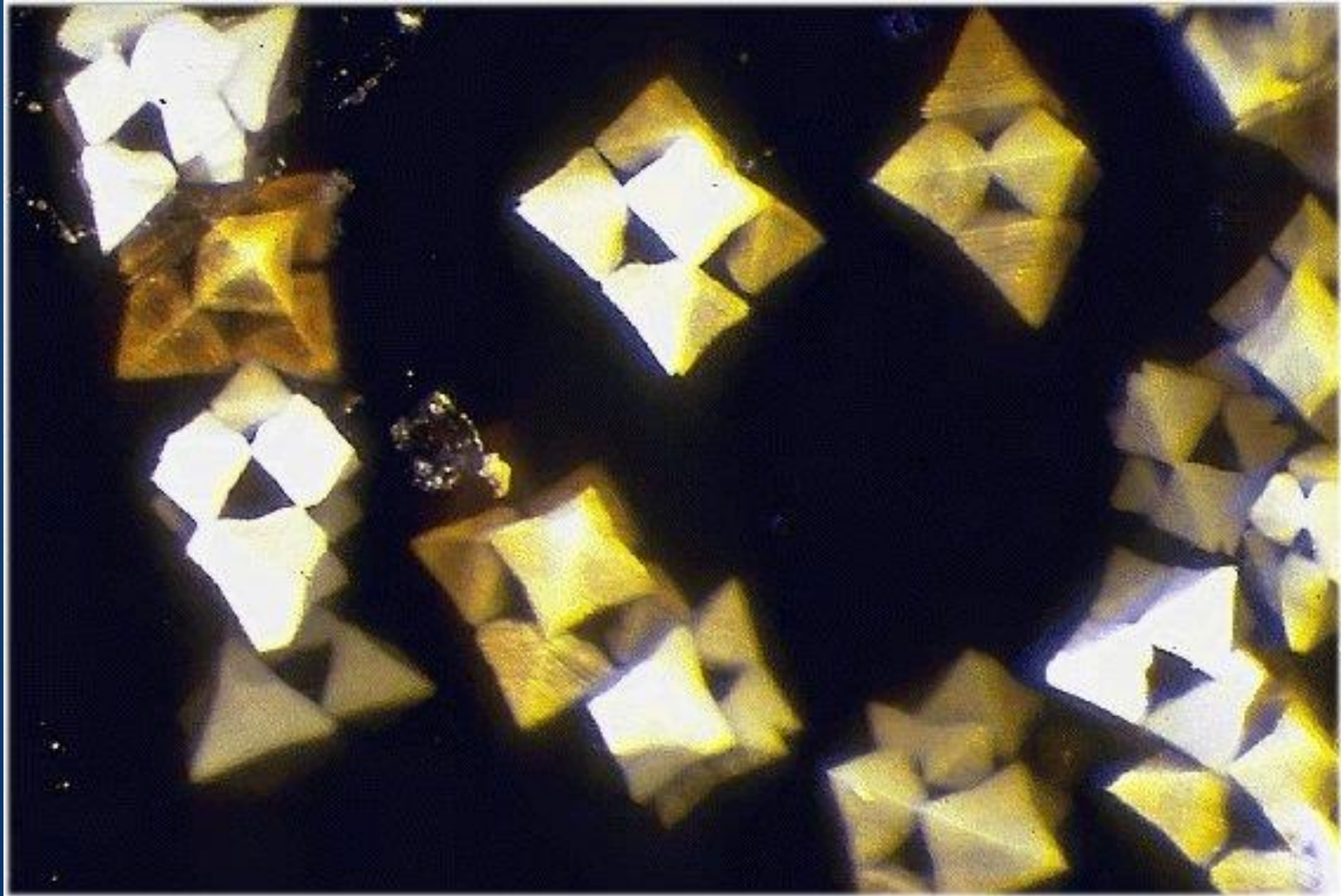
# Кристобалит



Известен в двух модификациях – кубический (высокий  $\beta$ -кристобалит) и тетрагональный (низкий  $\alpha$ -кристобалит).

Кубический кристобалит имеет каркасную структуру, образованную тридимитовыми сетками. В отличие от тридимита, соседние сетки смещены так, что под центром ячейки оказывается тетраэдр.

# Кристобалит



Cerro San Cristobal, Мексика

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

# Кристобалит



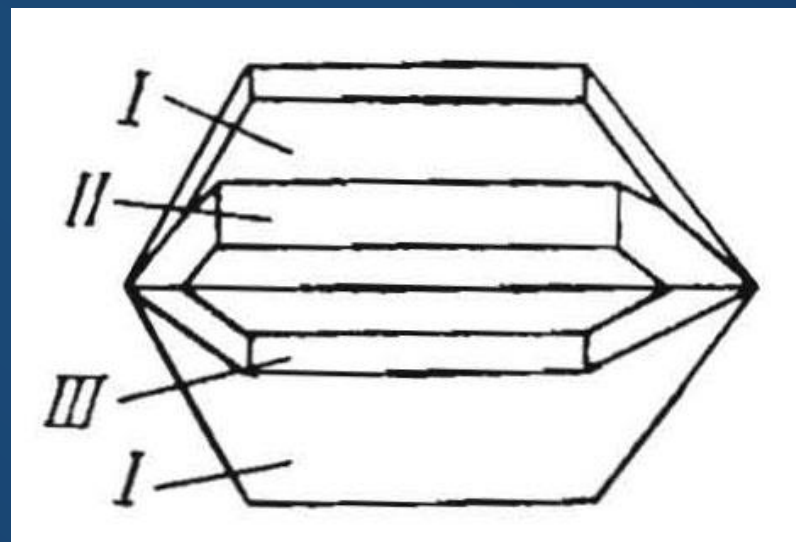
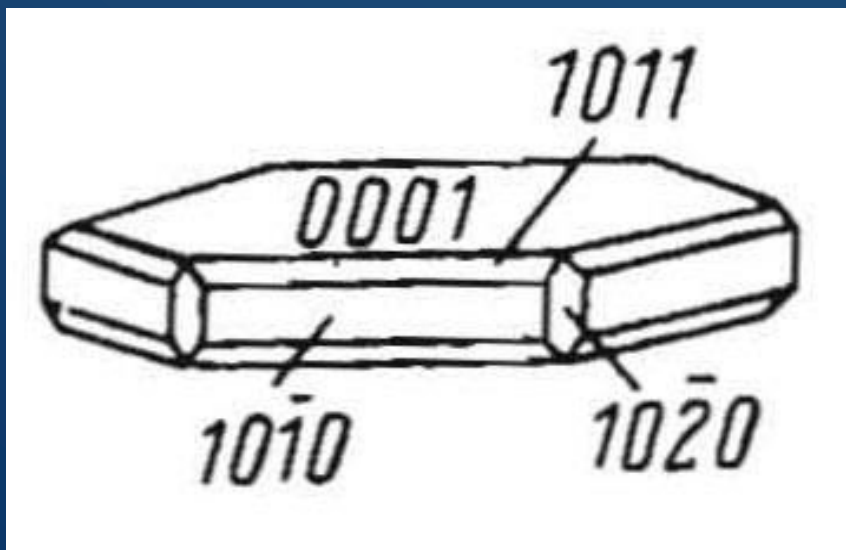
Минерал кислых  
эффузивов.

Может образовываться в  
метастабильных условиях  
- раскристаллизация  
стекол, опала  
(образование  
кристобалита в поле  
устойчивости  $\alpha$ -кварца  
объясняется близостью  
структуры кристобалита к  
изотропной «вязи»  
кремнекислородных  
тетраэдров  $\text{SiO}_4$  в стекле).

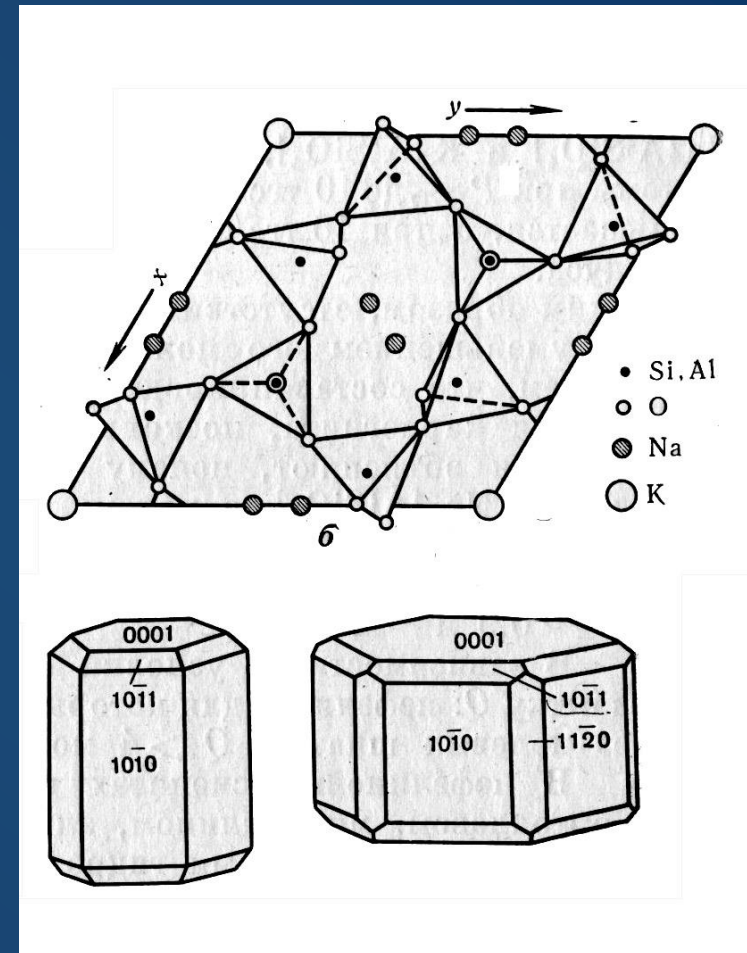
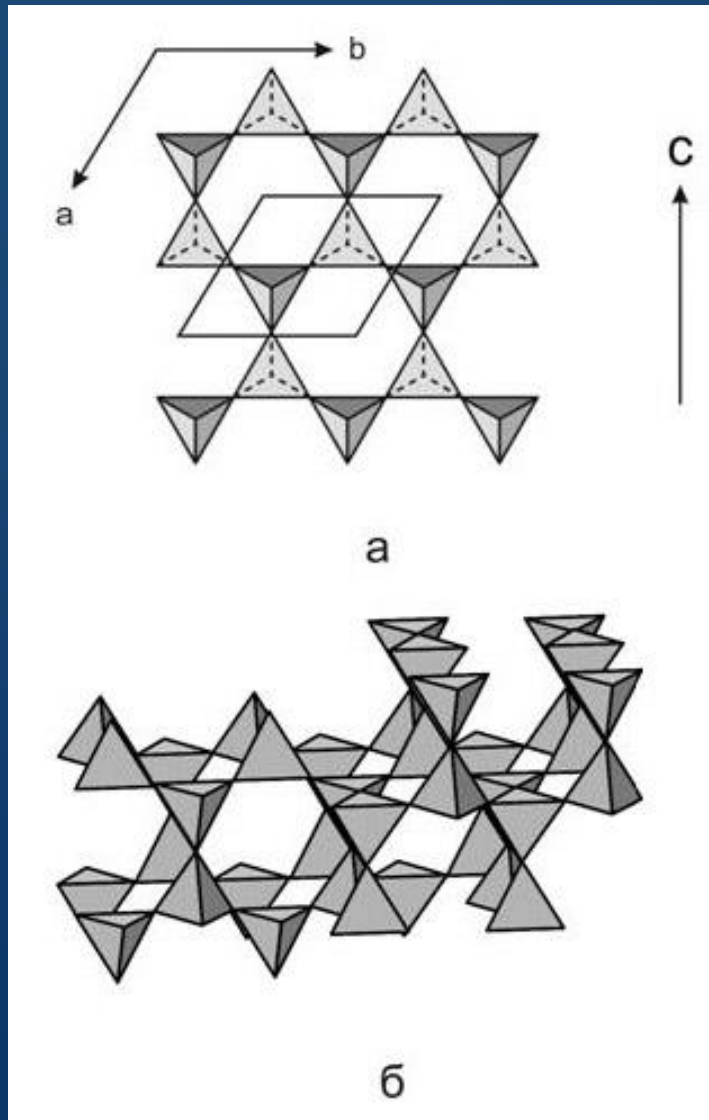


# Тридимит

*от греческого «тридимос» - тройной, т.к.  
часто образует тройники*



# Кристаллическая структура тридимита



Кристаллическая структура тридимита

Кристаллическая структура нефелина

# Тридимит

Может наблюдаться разная степень беспорядка в ориентации тетраэдров и как следствие различная последовательность чередования слоев.

Упорядоченный тридимит – гексагональный.

Крупные полости в структуре облегчают вхождение изоморфных примесей:

$\text{SiO}_2$  – 95-97 %, существенные примеси  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – до 2,7 %;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – до 3,2 %;  $\text{CaO}$  – до 1 %;  $\text{Na}_2\text{O}$  – до 0,8 %;  $\text{K}_2\text{O}$  – до 0,7 %.

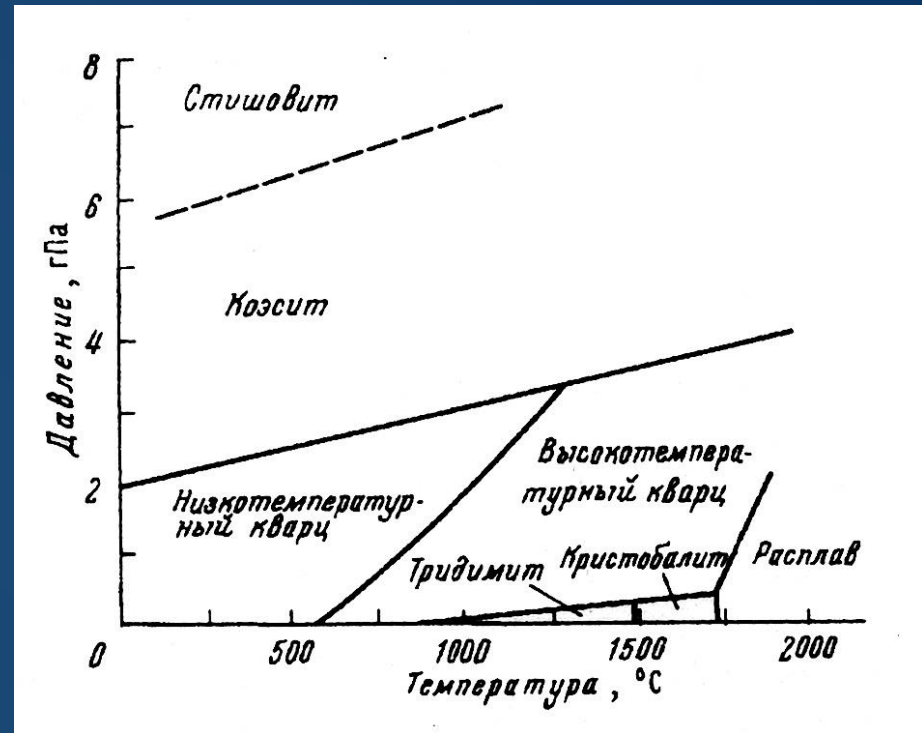
Наличие крупных полостей в структуре затрудняет переход тридимита в кварц.



# Тридимит



*Сросток кристаллов  
тридимита из полости в  
базальте, Германия*



Минерал кислых  
эффузивов. Образуется в  
метастабильных условиях —  
раскристаллизация стекол,  
опала.

# Моганит

Входит в состав многих халцедоновых конкреций и агатовых жеод, обычно как незначительная составляющая (редко - до 50-60%).



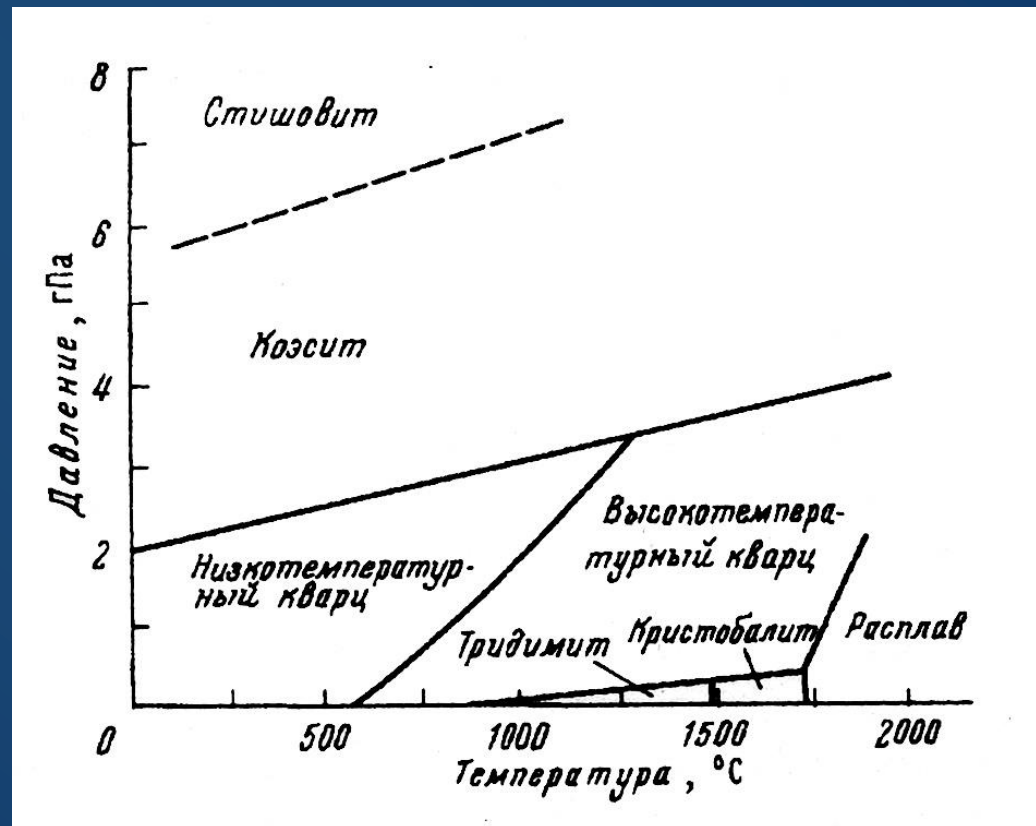
Mogán, Gran Canaria (Grand Canary), , Canary Islands, Spain  
[www.mindat.org](http://www.mindat.org)

*Моганит имеет структуру близкую  $\alpha$ -кварцу; в структуре моганита ламели правого кварца перемежаются с ламелями левого на уровне элементарной ячейки. Эти ламели ограничены плоскостью  $[101]$  (Peter J. Heaney, 1993).*

Образуется при раскристаллизации опала и вулканического стекла. Первоначально был установлен в качестве неназванного минерала в 1976 г., а затем описан под названием моганит в 1984 г., но без одобрения IMA. Только в 1999 году был утверждён IMA как новый минеральный вид.

Коэсит и стишовит – минералы кремнезема  
высоких давлений. *Кварц* – минерал земной  
коры, *коэсит* – верхней мантии, *стишовит* –  
нижней мантии.

Первоначально были  
синтезированы в  
лабораторных условиях.  
Названия были даны по  
именам исследователей  
(Лоринг Коэс, С.М.  
Стишов) впервые их  
синтезировавших.



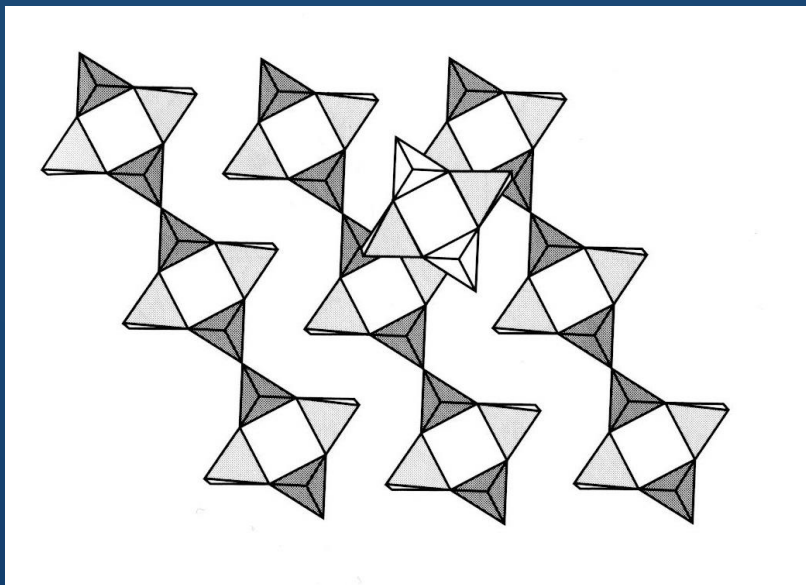


# Коэсит и стишовит

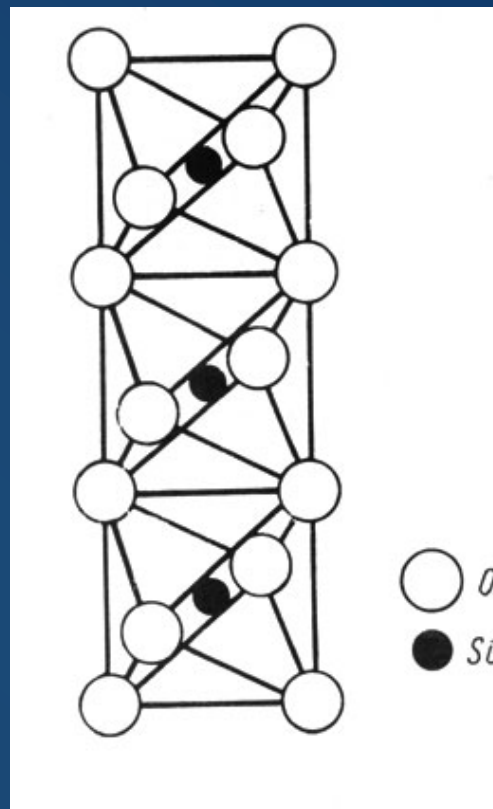


В природе впервые найдены в 1960 и 1962 гг в Аризонском метеоритном кратере. Образовались за счёт кварца песчаников при мгновенном повышении давления и температуры при падении метеорита.

# Коэсит и стишовит



Коэсит, мон.



СТИШОВИТ,  
тетр.

Группа  
рутила

Основу каркаса коэсита составляют четырехчленные кольца, связанные в гофрированные ленты. Ленты сочленяются в противофазе, образуя каркас. Коэсит является фазой, образующейся при высоком  $P$ . Дальнейшее повышение  $P$  приведет к образованию ПГУ атомов  $O$  в структуре стишовита, в которой  $Si$  располагается в ОП (структурный тип рутила).

# КОЭСИТ И СТИШОВИТ

Коэсит, помимо ударных кратеров, известен в кимберлитах, в эклогитах и т.д. Одно из наиболее известных проявлений - ультраметаморфические пироповые кварциты массива Дора-Майра (западные Альпы). По физ.-хим. данным при метаморфизме этих пород достигалось давление, характерное для глубин ~130 км.

Переход коэсита в кварц происходит с увеличением объема. В условиях земной коры коэсит сохраняется в виде включений в пиропе, цирконе и т.д.



# Коэсит в пиропе (Дора-Майра, Италия)



# Сейфертит

Природный ромбический полиморф кремнезема со структурой, аналогичной структуре  $\alpha\text{-PbO}_2$ ;  $K\text{Ч}_{\text{Si}}=6$ .

Является одним из самых плотных полиморфов кремнезема.  
*Сейфертит существует при давлениях гораздо более высоких, чем стишовит!*

Сейфертит установлен в виде ламелл в зёрнах кварцевого стекла только в марсианинских и лунных метеоритах. Предположительно, формируется из тридимита или кристобалита при ударных процессах при падении метеоритов в результате нагрева при минимальном давлении 35 ГПа.

Сейфертит теоретически может также образовываться в земной мантии на глубинах более 1700 км при условии наличия свободного кремнезёма.

# Свойства минералов $\text{SiO}_2$

Название	Показатель преломления	Твердость по Моосу	Плотность, г/см <sup>3</sup>
Тридимит	1,471-1,474	6	2,3
Кристобалит	1,484-1,487	7	2,3
Кварц	1,544-1,553	7	2,6
Коэсит	1,594-1,597	7,5	2,9
СТИШОВИТ	1,799-1,826	9	4,2



# Полиморфные превращения минералов $\text{SiO}_2$

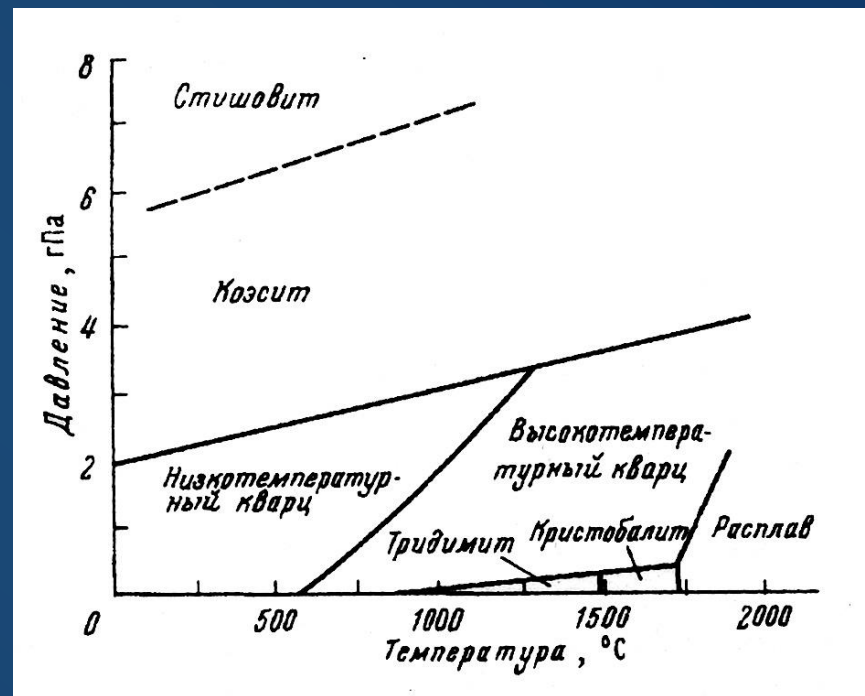
Типы полиморфных переходов:

а) реконструктивный переход с изменением структуры (изменение КП, КЧ, типа укладки КП)

переходы кристоболит-тридимит-кварц-коэсит-стишовит

б) переход искажения (поворот отдельных атомных групп друг относительно друга без разрыва основных связей)

переход  $\alpha$ - $\beta$  кварц,  $\alpha$ - $\beta$  кристобалит,  $\alpha$ - $\beta$  тридимит



# Полиморфные превращения минералов $\text{SiO}_2$

- Переход  $\alpha$ – $\beta$  кварца энантиотропный
- Температура перехода  $573^\circ\text{C}$  (зависит от наличия примесей и давления)

*Образование молочного, сотового кварца*

*Образование метасоматитов по кварцевым  
и безкварцевым породам*

*«Открытие» пегматитовых систем*

*Формирование ювелирного кварца*

# Опал $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$

Опал состоит из глобулей  $\text{SiO}_2$ , размер которых обычно составляет сотни нм. Благодаря глобулярной структуре опал имеет большое количество микропор, соединяющиеся иногда в каналы. Следствием является низкая плотность ( $1,8 - 2,3 \text{ г/см}^3$ ) и высокая адсорбционная способность.

Состав:  $\text{SiO}_2$  – 65-90 %,  $\text{H}_2\text{O}$  – 4-20 %.

В значительном количестве могут присутствовать Al, Fe, Mn, органические вещества и т.д.

Характерно самопроизвольное растрескивание!



# Опал $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$

Формы выделения — корки, прожилки, натечные агрегаты, оолиты, скелеты морских организмов (губки, радиолярии и др.). Распространены псевдоморфозы по животным и растительным остаткам.

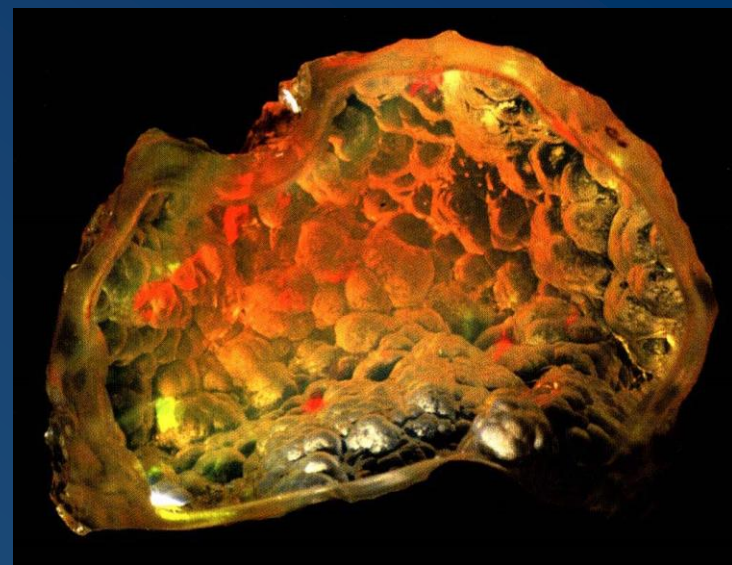
## РАЗНОВИДНОСТИ:

ПРОСТОЙ ОПАЛ, ПЕЙЗАЖНЫЙ  
ОПАЛ, ДЕНДРООПАЛ

ОГНЕННЫЙ ОПАЛ

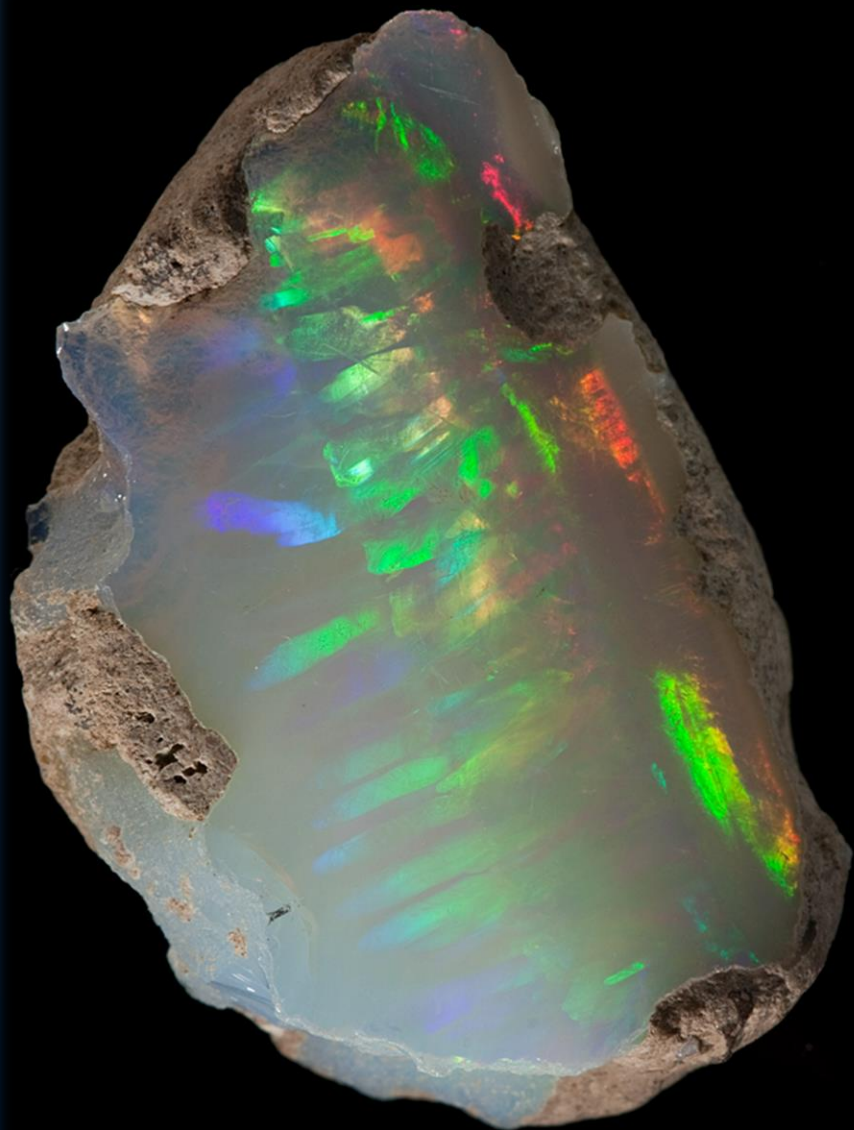
БЛАГОРОДНЫЙ ОПАЛ

# Огненный опал



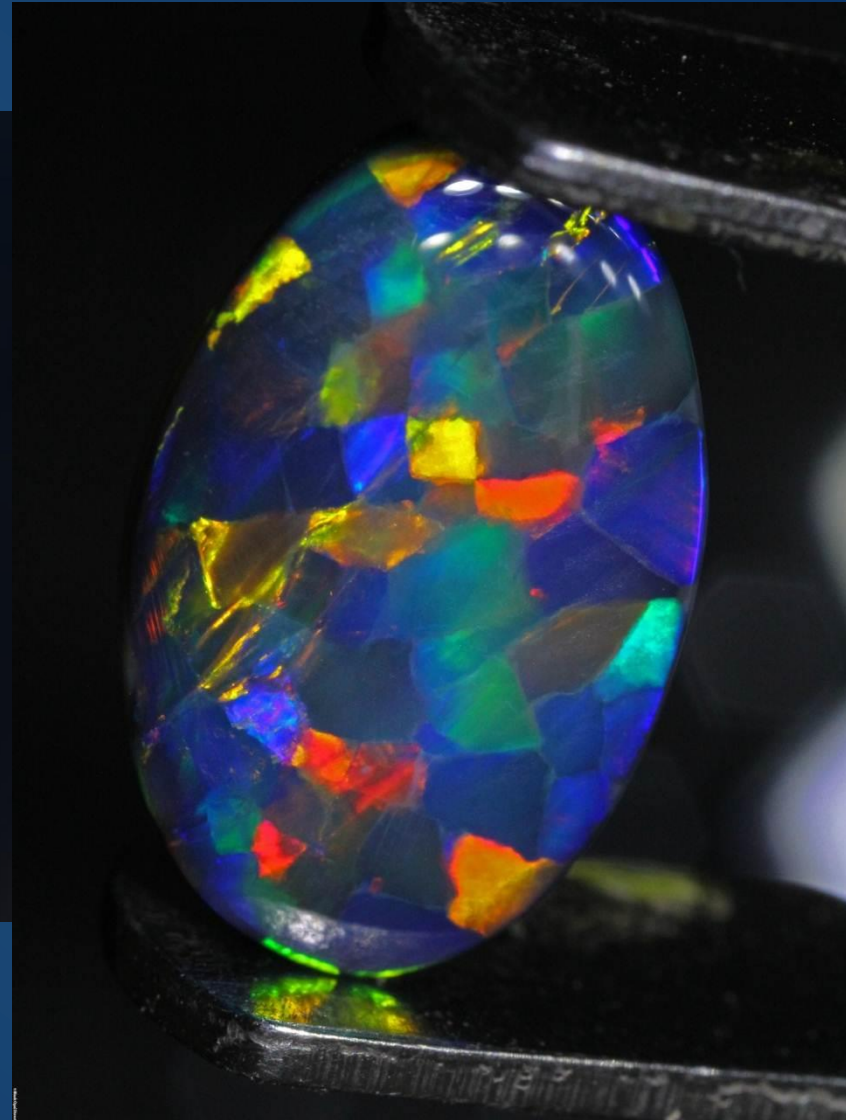
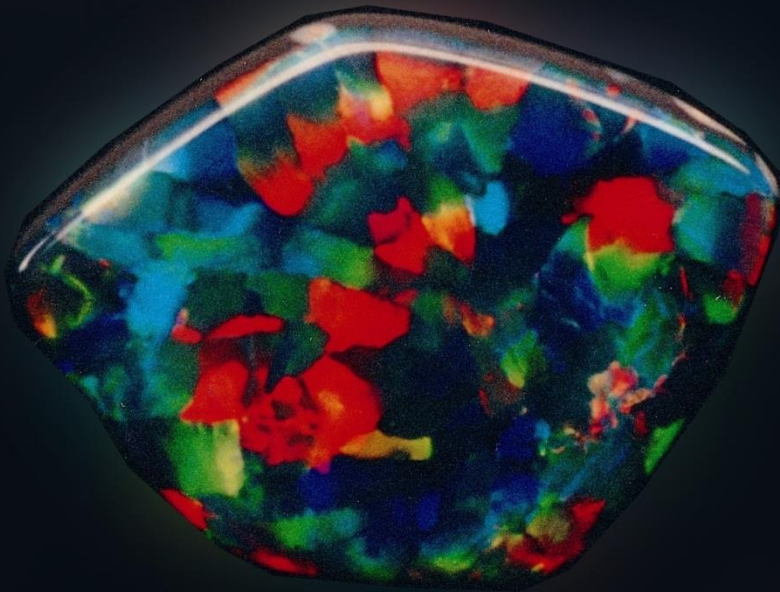


# Благородный опал



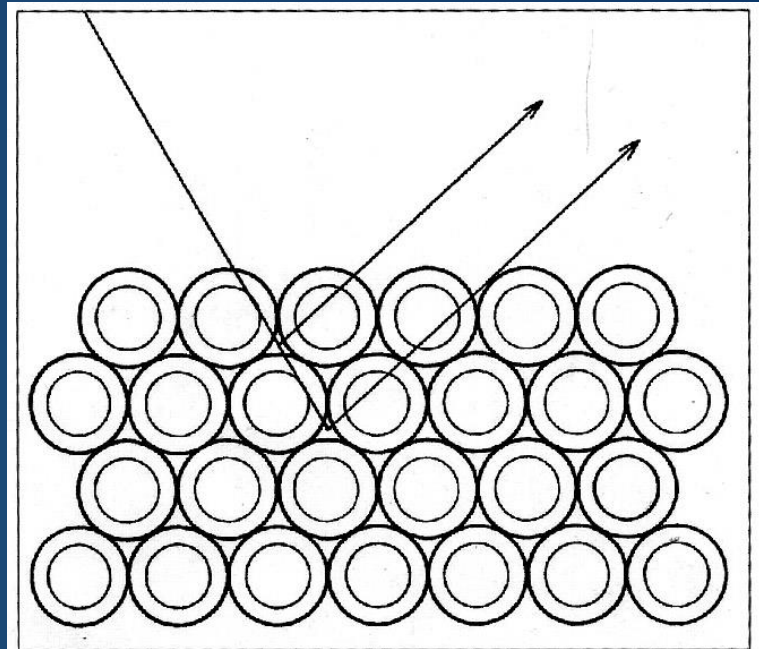
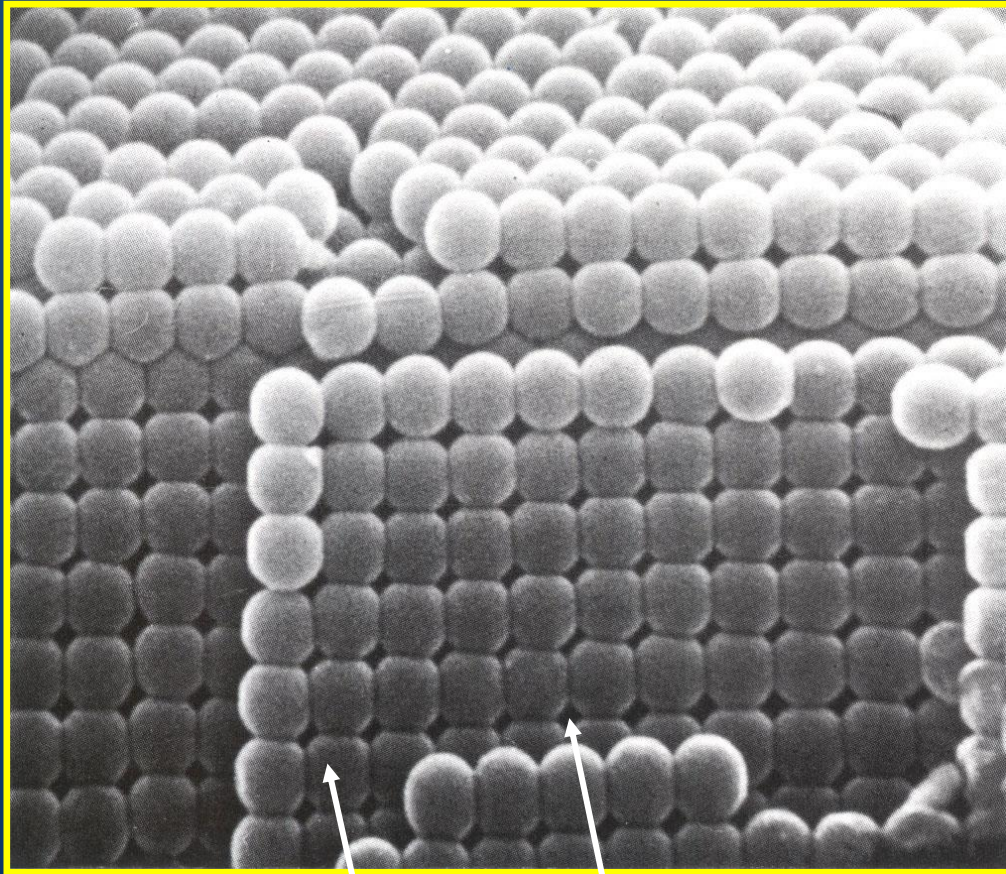


# Благородный опал



# Структура благородного опала

## – ПКУ или ГПУ глобулей кремнезема



Дифракция света в  
благородном опале

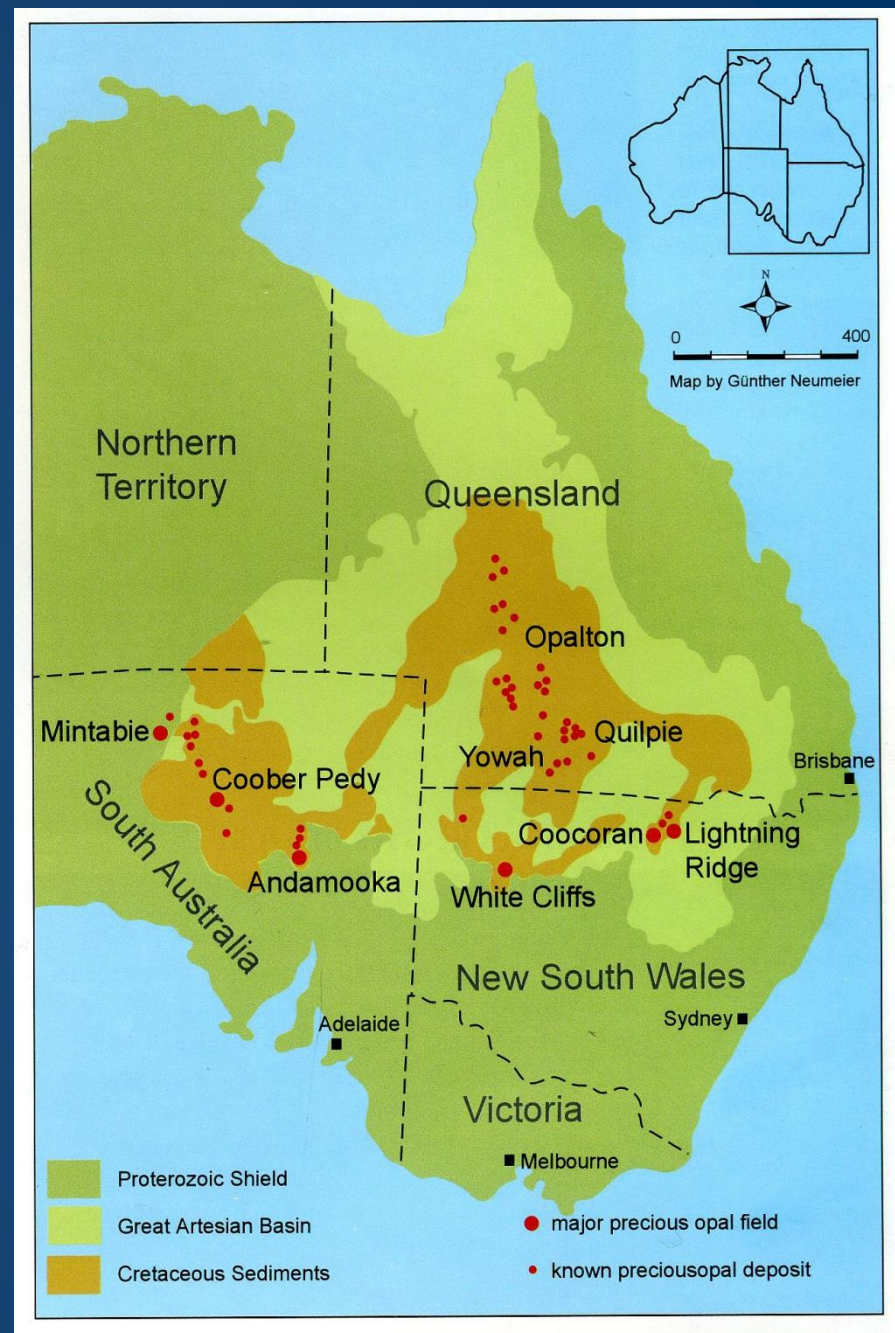
$$n\lambda = 2d \sin \theta$$



# Генезис опала

- Низкотемпературный (Т ниже 100-150°C) гидротермальный (гейзериты, часто в агатовых жеодах)
- Коры выветривания силикатных пород (Т 20-50°C)
- Осадочный (хемогенный и биогенный)

**Месторождения Австралии – обеспечивают до 95 % мировой добычи ювелирного благородного опала!**



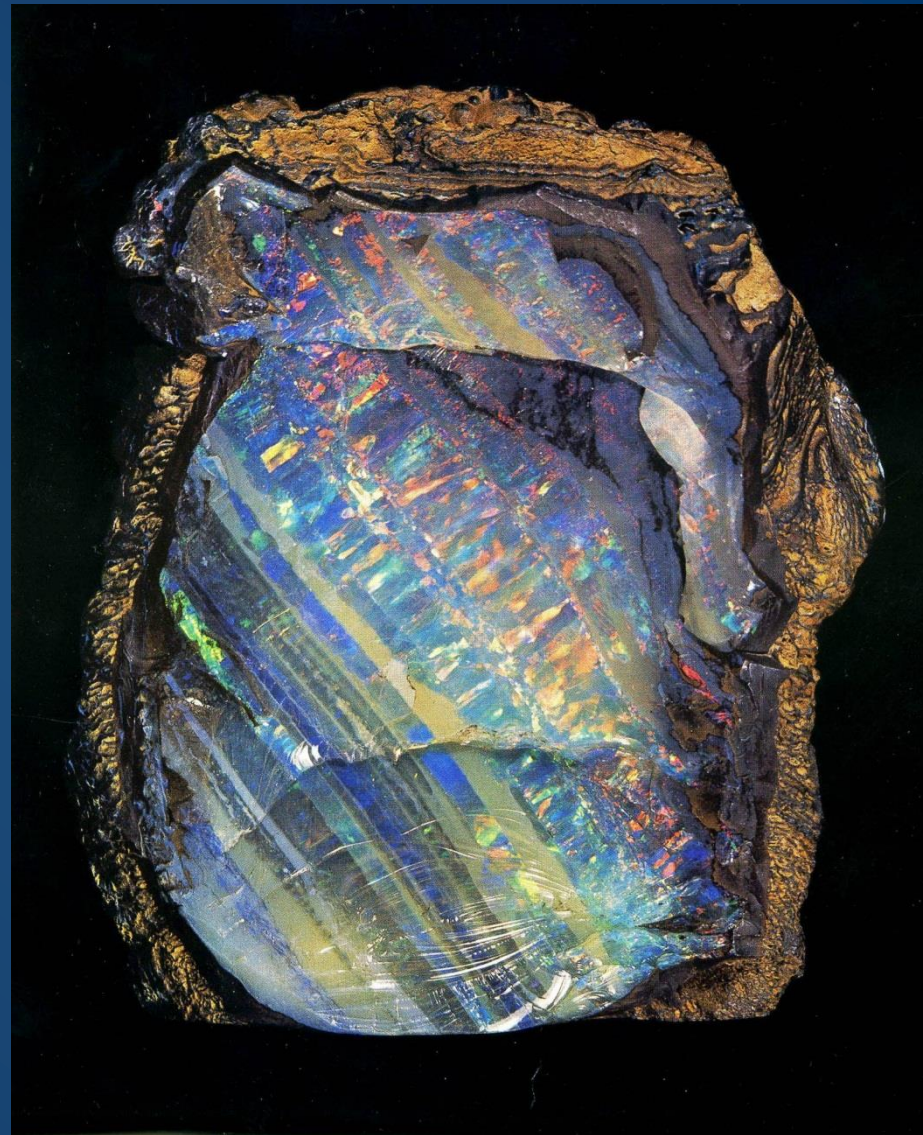


# Месторождения благородного опала Австралии



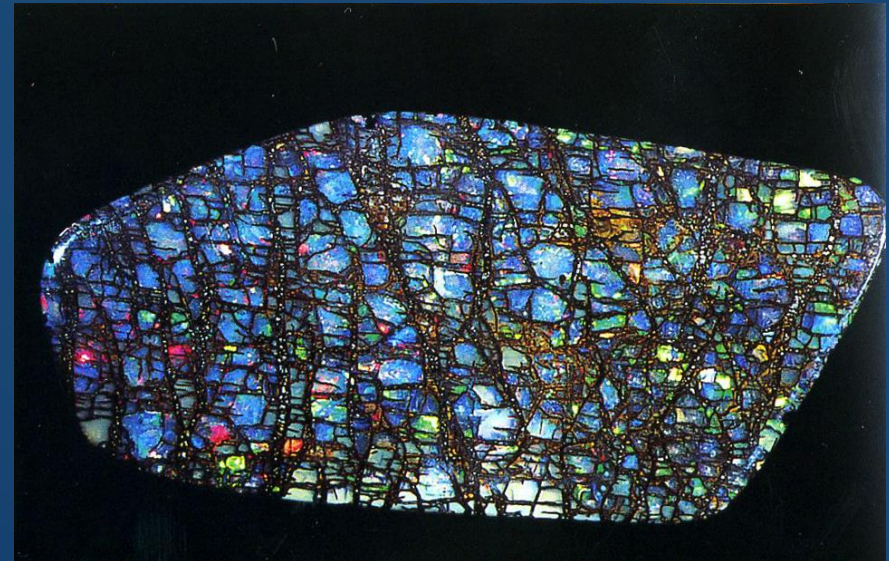
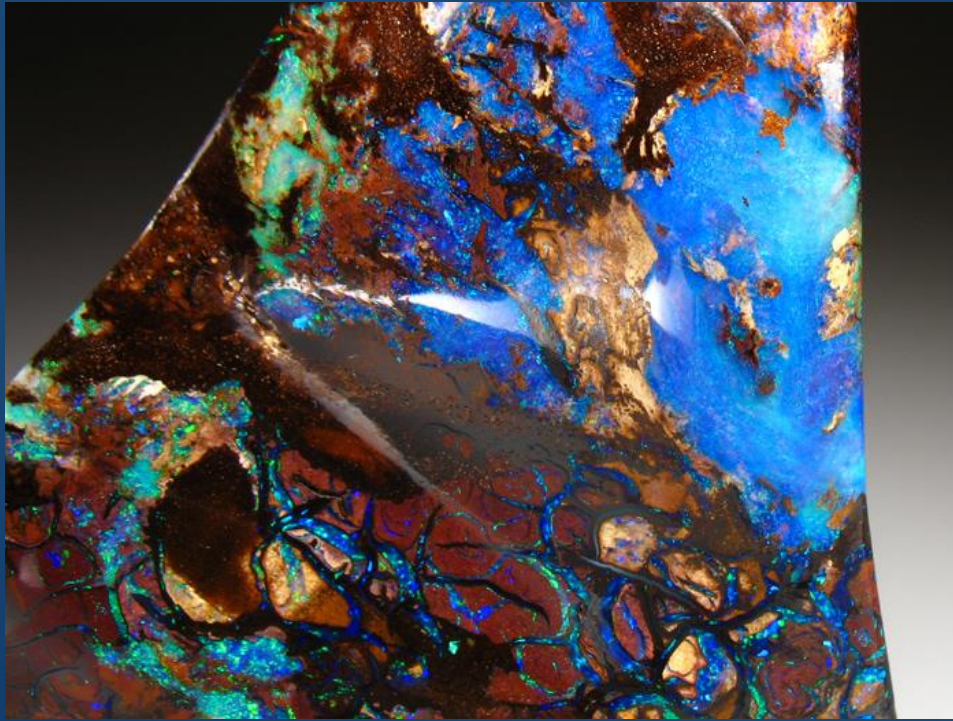


# Месторождения благородного опала Австралии



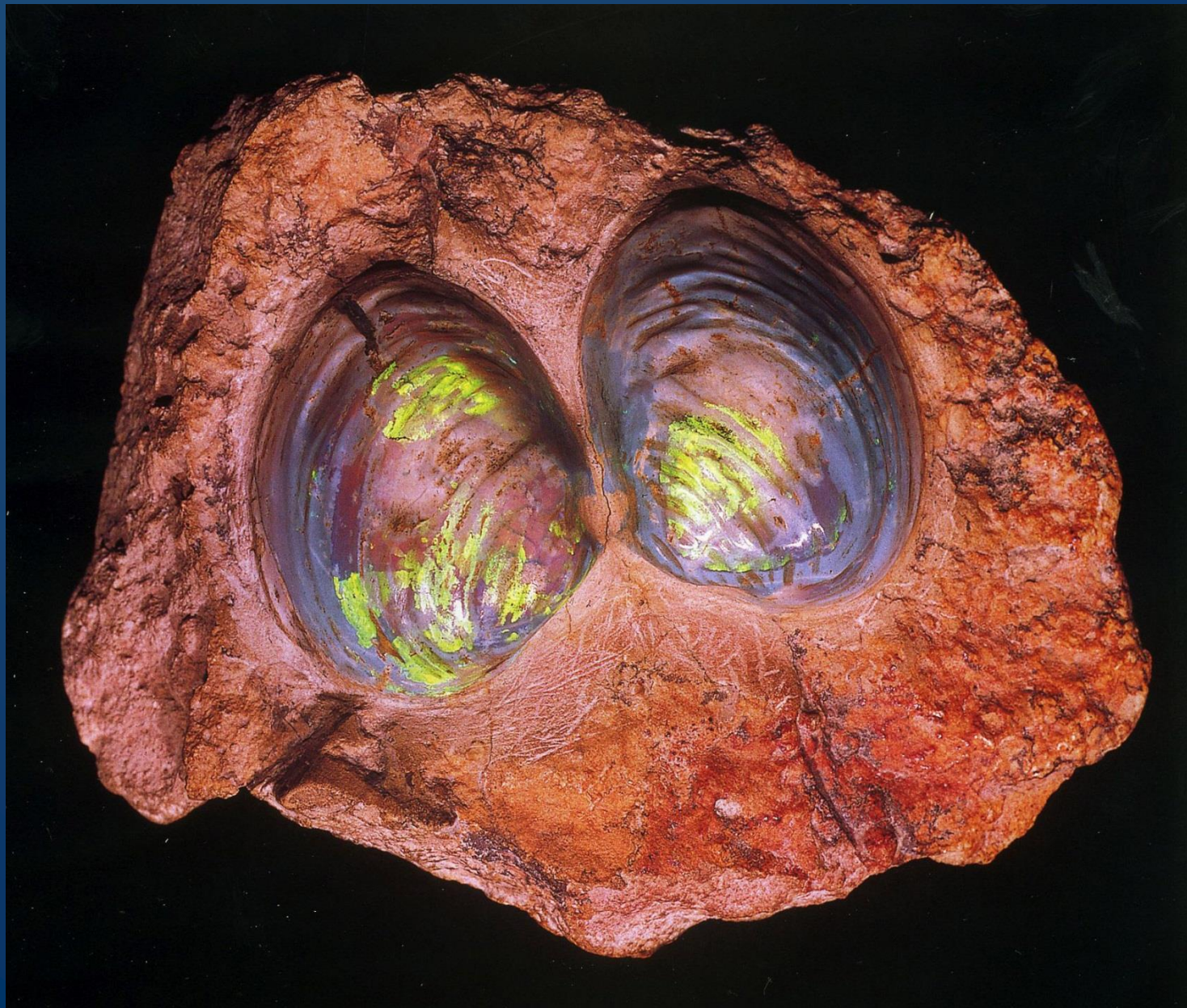


# Месторождения благородного опала Австралии





# Месторождения благородного опала Австралии





# Месторождения благородного опала Австралии



«Двойная»  
псевдоморфоза  
икаит-кальцит-  
опал

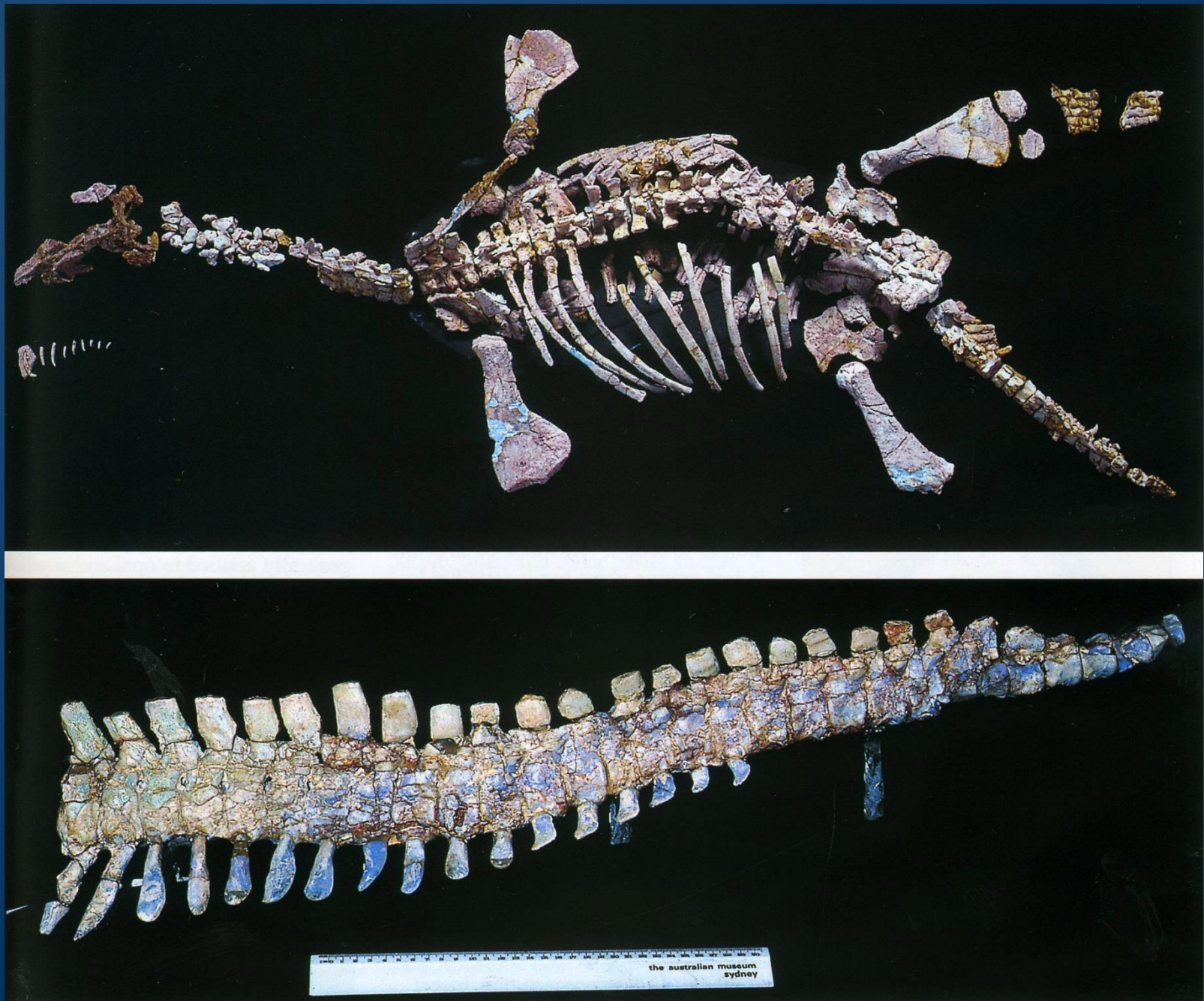


# Месторождения благородного опала Австралии





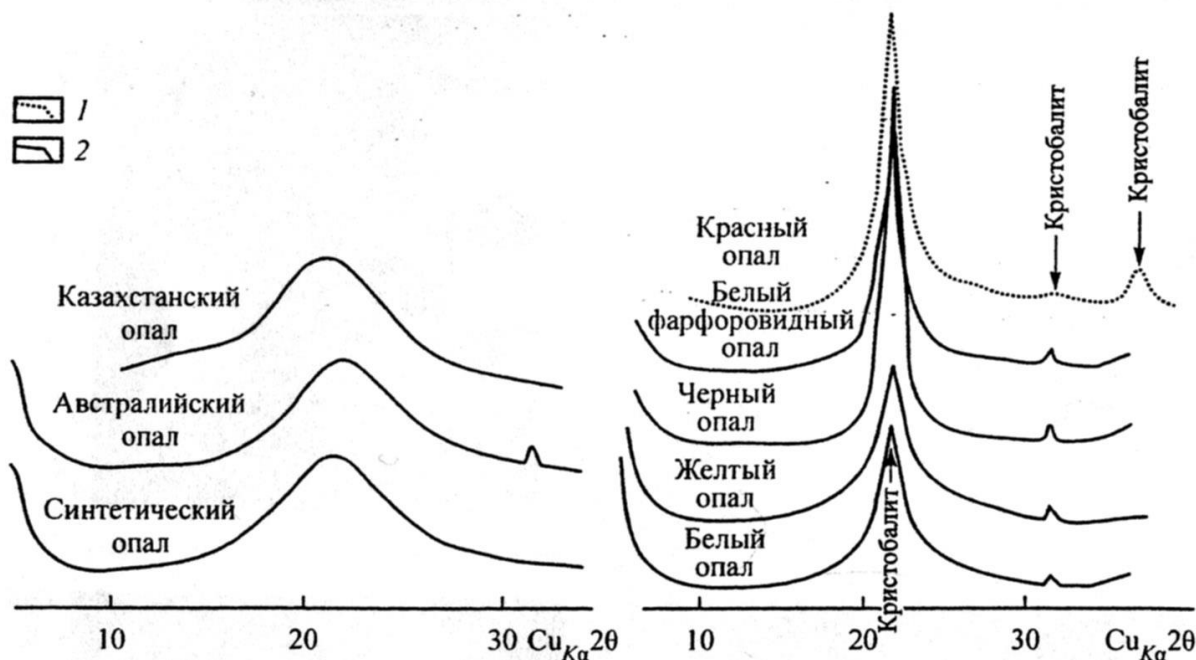
# Месторождения благородного опала Австралии



# Раскристаллизация опала

## А-опал, К-опал, КТ-опал

В ходе «старения» опал замещается кристобалитом и тридимитом (структурно близки аморфному опалу), затем халцедоном и  $\alpha$ -кварцем.



Рентгенограммы благородных опалов А-типа (слева) и К-типа (справа).  
Опалы К-типа: 1 — африканские (Эритрея), 2 — из месторождения Радужное, Приморье.