

CRYSTALS AND X-RAYS

D. Yu. PUSHCHAROVSKY

The principles of X-ray diffraction in crystals are considered as well as the modern problems of structural mineralogy and the new approaches to their solutions. The results of the unique studies using the advanced synchrotron radiation, the investigations of the structural transformations in minerals under high pressure, the new subdivisions of structural systematics of minerals are reported.

Рассмотрены теоретические основы дифракции рентгеновских лучей в кристаллах. Дан обзор важнейших современных структурно-минералогических проблем и новых подходов к их решению. Приведены результаты уникальных экспериментов по структурной расшифровке мельчайших кристаллов с использованием синхротронного излучения, а также новые данные по исследованию структурных изменений минералов в рентгеновских камерах высокого давления.

© Пуцаровский Д.Ю., 1997

КРИСТАЛЛЫ И РЕНТГЕНОВСКИЕ ЛУЧИ

Д. Ю. ПУЦАРОВСКИЙ

Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова

ВВЕДЕНИЕ

Основоположник российской школы рентгеноструктурного анализа кристаллов академик Н.В. Белов считал, что положение структурной кристаллографии среди других наук можно охарактеризовать центром треугольника, в вершинах которого находятся физика, химия и минералогия. Именно в кристаллографии в полной мере проявляется синтез достижений, отмечаемых во всех трех дисциплинах.

Современный рентгеноструктурный анализ стал мощным инструментом изучения структуры веществ, открывающим много интересных фактов и позволяющим по-новому взглянуть на многие природные явления. Общее число расшифрованных к середине 90-х годов структур превысило 150 тыс. Благодаря усовершенствованным методам, автоматизированной аппаратуре и вычислительным средствам стало возможным определять структуры самых сложных кристаллов вплоть до белковых, содержащих сотни атомных группировок. На основе структурных данных удается интерпретировать разную температуру отдельных частей белковых молекул. Были разработаны специальные рентгеновские камеры, в которых достигаются давления, в миллионы раз превосходящие атмосферное. Это позволяет моделировать и изучать состояние вещества в глубинных оболочках Земли. Иллюстрацией изменения многих свойств различных кристаллов при таких высоких физико-химических параметрах может служить зафиксированный переход молекулярной структуры серы с ковалентной связью между атомами в структуру, характеризующуюся металлическим типом межатомных взаимодействий. Структурные данные существенно расширяют научные представления о симметрии кристаллов. Так, например, в 1984 году открыты квазикристаллы Al_6Mn , ближний порядок в которых характеризуется запрещенной с точки зрения классической геометрической кристаллографии пятерной поворотной осью. Отсутствие четко выраженных параллельных переносов (трансляций) в такого рода кристаллах позволяет заключить, что строгая периодичность в кристаллических структурах не является обязательным условием для получения дифракционных картин.

Приведенные примеры лишь частично характеризуют современный уровень структурных исследований, на пути к которому рентгеновская

кристаллография прошла большой путь, начавшийся 8 ноября 1895 года. В этот день профессор физики Вильгельм Конрад Рентген в университете Вюрцбурга в Баварии, экспериментируя с катодными лучами, заметил, что экран с кристаллами платиноцианида бария, поднесенный к разрядной трубке, покрытой черной бумагой, начинал флюоресцировать. Применение открытых таким образом X-лучей в кристаллографии началось в 1912 году, когда физик-теоретик М. Лауэ высказал идею об использовании кристаллов в качестве оптических решеток для определения длин составляющих их волн. Полученные дифракционные картины подтверждали, с одной стороны, трехмерную периодичность упаковки материальных частиц в кристалле, а с другой — обосновывали волновую природу X-лучей. Спустя лишь год У.Г. Брэгг и У.Л. Брэгг (ставшие в 1915 году нобелевскими лауреатами) определили первую структуру NaCl, положив начало развитию рентгеновской кристаллографии. Все эти эксперименты, по мнению широко известного специалиста в области рентгеновской дифракции профессора Массачусетского технологического института М. Бюргера, стали поворотным пунктом не только в кристаллографии, но и во всей современной науке.

НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ РЕНТГЕНОСТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА: ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Полученная за последние 85 лет информация по кристаллохимии способствовала развитию многих научных дисциплин. Однако ее наиболее весомый вклад отмечен в минералогии, где методы рентгеновской дифракции играют ключевую роль в исследовании состава и структуры минералов, расширяя научные представления о минералогической систематике, формах концентрации химических элементов в геосферах, об изоморфизме, полиморфизме и многих других кристаллохимических явлениях в минералах. Вместе с тем структуры ~20% из почти 4 тыс. установленных на Земле минералов остаются нерешенными. При этом в последнее десятилетие возможности рентгеновских дифракционных экспериментов для исследования кристаллических структур значительно возросли благодаря применению источников синхротронного излучения. По мощности они превосходят рентгеновские трубки в сотни и даже тысячи раз. Основное различие между двумя источниками X-лучей заключается в том, что в рентгеновской трубке электроны при соударении с анодом на скорости 10 км/с теряют свою энергию, почти полностью превращая ее в тепло, тогда как в синхротроне энергия электрона практически полностью переходит в электромагнитное излучение. Большая интенсивность и малая расходимость пучка синхротронного излучения весьма полезны при структурных исследованиях очень мелких кристал-

лов с размерами 5–50 мкм. Именно таким путем была получена четкая дифракционная картина от монокристалла флюорита с ребром около 0,006 мм. С помощью достаточно мощной (3 кВт) рентгеновской трубки аналогичную картину удалось получить от кристалла флюорита с объемом, почти в 1000 раз большим.

Новые возможности, связанные с использованием синхротронного излучения, совсем недавно позволили расширять структуру раита — силиката со сложным составом $\text{Na}_3\text{Mn}_3\text{Ti}_{0,25}[\text{Si}_8\text{O}_{20}](\text{OH})_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$. Этот гидратированный Na, Mn-силикат был открыт в 1973 году в пегматитовой жиле Юбилейная, в пределах Ловозерского щелочного массива на Кольском полуострове. Название этому минералу дано в честь международной экспедиции, возглавлявшейся норвежским путешественником Т. Хейердалом на плоту “Ра”. Структурное исследование выполнено на игольчатом кристалле раита с диаметром ~0,003 мм (диаметр человеческого волоса ~0,06 мм, примерно в 20 раз толще). Сотрудничество исследователей МГУ с группой кристаллографов из Университета Чикаго (США) во главе с профессором Дж. Смитом позволило провести сбор экспериментальных данных в Европейском центре синхротронных исследований (Гренобль, Франция). Дифракционная картина зарегистрирована при 73 разных ориентациях кристалла с использованием позиционно-чувствительного детектора. Оказалось, что в основе структуры раита — каркас из кремнекислородных слоев, контактирующих с лентами из Mn- и Na-октаэдров (рис. 1). Туннели образующегося каркаса частично заселены Na-октаэдрами. Тетраэдрические кремнекислородные слои характеризуются так называемой инверсией, проявляющейся в смене ориентации у тетраэдров в соседних выделяющихся в слое лентах (рис. 2). Эта смена ориентации тетраэдров в кремнекислородных слоях раита осуществляется через две цепочки, параллельные оси *c*. Такие же тетраэдрические слои ранее были установлены в структуре палыгорскита $\text{Mg}_5[\text{Si}_8\text{O}_{20}](\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, тогда как в слоях другого водного Mg-силиката сепиолита — $\text{Mg}_8[\text{Si}_{12}\text{O}_{30}](\text{OH})_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ смена ориентации в тетраэдрических слоях осуществляется через три цепочки. В 1997 году практически одновременно с опубликованием структуры раита группа исследователей во главе с профессором Дж. Феррарисом (Университет Турина) предложила структурную модель нового щелочного силиката калиферсита $\text{K}_3\text{Fe}_7^{3+}[\text{Si}_{20}\text{O}_{50}](\text{OH})_6 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$, открытого также на Кольском полуострове. Чрезвычайно интересным представляется чередование в этой структуре блоков (модулей) раита (палыгорскита) и сепиолита. Это кристаллохимическое явление, предполагающее рассмотрение структурных серий в виде сочетания в разных отношениях однотипных блоков, получило название *полисоматизма* и в последние годы все чаще выявляется при исследовании структур

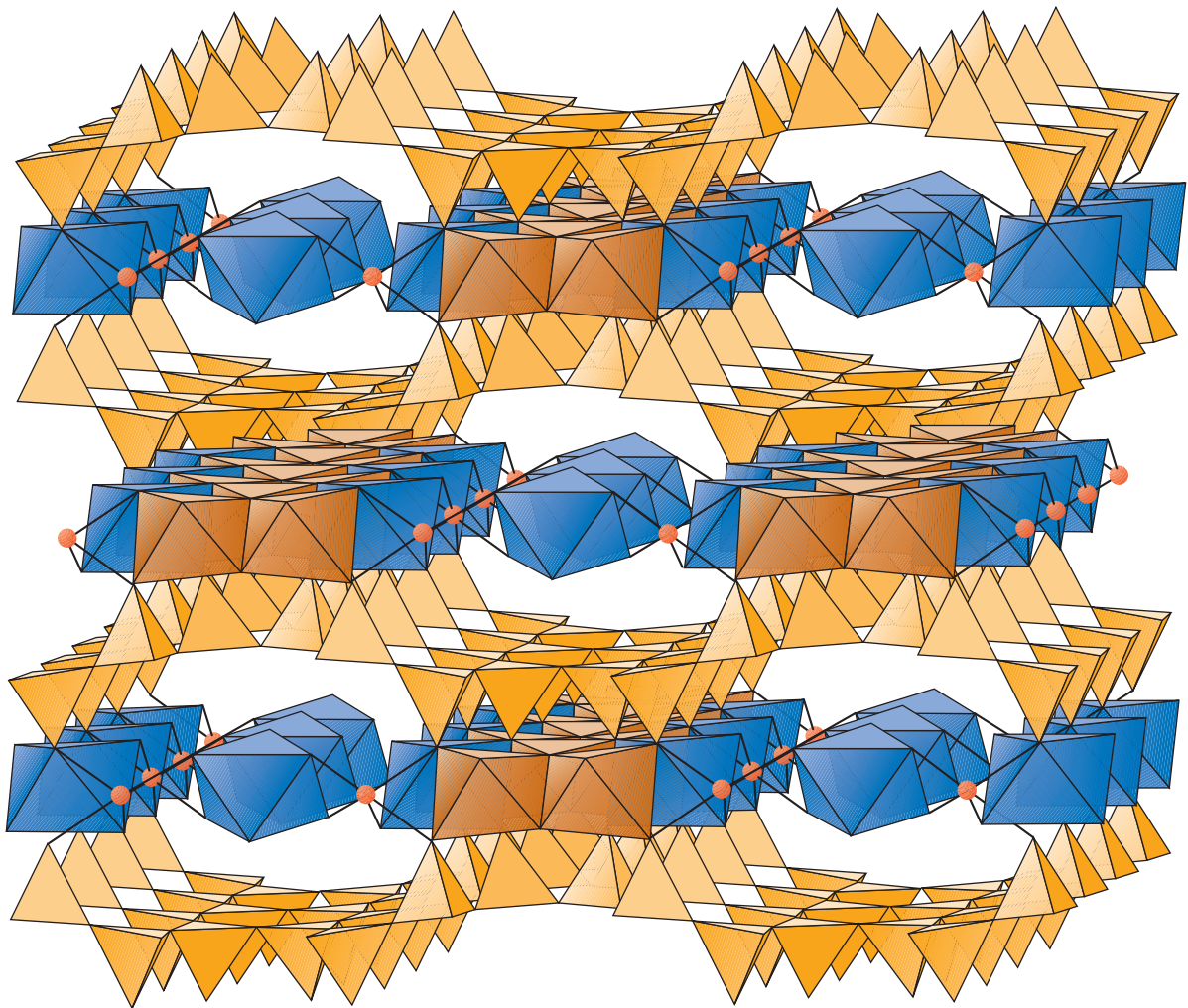


Рис. 1. Структура раита: сетки из $[\text{SiO}_4]$ -тетраэдров выделены желтым цветом; MnO_6 -октаэдры – коричневым, а NaO_6 -октаэдры – синим. Красные кружки – атомы Ti

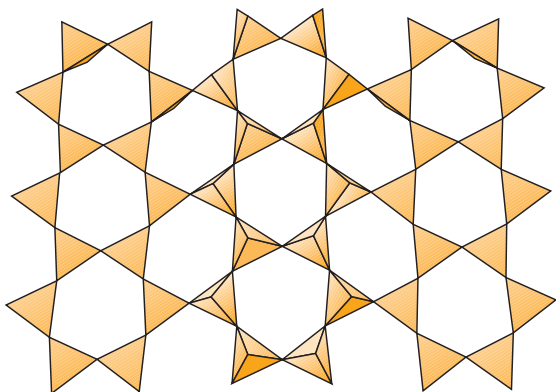


Рис. 2. Кремнекислородные сетки из $[\text{SiO}_4]$ -тетраэдров, характеризующиеся сменой их ориентации по отношению к плоскости слоя

минералов. Таким образом, если обозначить структурные модули палыгорскита символом (P), а сепиолита – (S), то обозначение построенной из них структуры калиферстита соответствует символу P_1S_1 .

ДИФРАКЦИЯ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ. МИНЕРАЛЫ ГЛУБИННЫХ ГЕОСФЕР

Структура раита представляет собой один из 4000 структурных типов, выявленных у неорганических соединений (по данным базы данных TYPIC на конец 1995 года, неорганические кристаллы, исключая оксиды и галогениды, описываются 3600 структурными типами). Относящиеся к неорганическим соединениям минералы, слагающие верхнюю оболочку Земли – земную кору и глубинную мантию, по своему структурному разнообразию заметно различаются. При этом сотни структурных типов характерны для минералов земной коры, тогда как

минералы глубинных геосфер описываются лишь ~10 структурными типами. Число прямых данных о составе глубинных областей Земли весьма ограничено — они все еще недоступны исследователям. Вместе с тем относительно новая рентген-дифракционная методика успешно применяется в последние два десятилетия для исследования закономерностей структурных изменений и превращений минералов, которые находятся в лабораторных условиях под воздействием высоких давлений и температур, характерных для глубинных геосфер.

В эксперименте обычно используют рентгеновские камеры с алмазными наковальнями, которые представляют собой маленькие усеченные пирамиды диаметром верхнего основания примерно 0,5 мм и высотой 2,5 мм. Между ними зажата стальная шайба толщиной около 0,2 мм с отверстием диаметром 0,3 мм, которое заполняется каплей жидкости (обычно смесью этилового и метилового спиртов), передающей давление. Внутри такой миниатюрной “камеры” помещают исследуемый кристаллик и мелкие кусочки рубина, по сдвигу линии люминесценции которого определяют создаваемое при сближении наковален давление; в эксперименте оно достигает миллиона атмосфер. Уже сейчас таким методом изучены несколько десятков минералов и синтетических соединений. Среди них доминируют силикаты — важнейшие породообразующие минералы, составляющие вместе с кремнеземом около 90 % литосферы и характеризующиеся исключительным разнообразием (свыше 100) способов укладки в их структурах кремнекислородных тетраэдров $[\text{SiO}_4]$ [1], которые помимо изолированных группировок могут образовывать кольца, цепочки, слои или каркасы. Однако все это относится к минералам, залегающим на сравнительно небольших глубинах. С увеличением глубины межатомные расстояния Si—O в основных строительных “кирпичах” силикатов — тетраэдрах $[\text{SiO}_4]$ под действием усиливающихся внешних давлений постепенно сокращаются. Достижение критической длины связи Si—O, равной 1,59 Å, сопровождается изменением тетраэдрической координации Si на октаэдрическую [2].

Проведенные геофизические и геохимические эксперименты показали, что при давлениях свыше 150–200 кбар (это соответствует глубине ~650 км) продукты преобразования многих минералов, в том числе и таких распространенных, как оливин, пироксены и гранаты, относятся к структурному типу перовскита. Перовскитоподобные фазы с формулой $(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})(\text{Si}, \text{Al})\text{O}_3$ содержат кремний в октаэдрической координации и, по мнению некоторых ученых, должны составлять около 70% глубинной мантийной зоны. Сравнительно недавно эти заключения получили экспериментальное обоснование. Образцы Mg-перовскита MgSiO_3 были подвергнуты давлению, в 1,3 млн раз превышающему атмосферное [3]. Такое давление, как полагают, существует

на глубине около 2800 км. Одновременно на образец, помещенный между алмазными наковальнями, воздействовали лазерным лучом с температурой около 2000 К, что соответствует условиям нижней мантии.

Оказалось, что ни во время, ни после эксперимента минерал не изменил свою структуру и состав. Таким образом, был сделан вывод, согласно которому стабильность Mg-перовскита позволяет рассматривать его как наиболее распространенный минерал на Земле, составляющий, по-видимому, почти половину ее массы [3]. Другим распространенным глубинным минералом считается, по данным рентгеновских экспериментов при высоких давлениях, магнезиовюстит $(\text{Mg}, \text{Fe})\text{O}$, имеющий хорошо известную структуру каменной соли, на долю которого приходится около 20% вещества мантии ниже границы 650 км. Оставшиеся примерно 10% мантийного вещества составляют оксидные фазы, содержащие Ca, Na, K и Fe. Интересно, что в преобладающих на больших глубинах перовскитоподобных фазах может содержаться весьма ограниченное количество Fe, а повышенные концентрации Fe среди минералов глубинной ассоциации характерны лишь для магнезиовюстита. При этом для магнезиовюстита доказана возможность перехода под воздействием высоких давлений части содержащегося в нем двухвалентного железа в трехвалентное, остающееся в структуре минерала, с одновременным выделением соответствующего количества нейтрального железа. На основе этих данных сотрудники геофизической лаборатории Института Карнеги Х. Мао, П. Белл и Т. Яги выдвинули новые идеи о дифференциации вещества в глубинах Земли. На первом этапе благодаря гравитационной неустойчивости магнезиовюстит погружается на глубину, где под воздействием давления из него выделяется некоторая часть железа в нейтральной форме. Остаточный магнезиовюстит, характеризующийся более низкой плотностью, поднимается в верхние слои, где вновь смешивается с перовскитоподобными фазами. Контакт с ними сопровождается восстановлением стехиометрии (то есть целочисленного отношения элементов в химической формуле) магнезиовюстита и приводит к возможности циклического повторения описанного процесса.

Таким образом, структурные исследования в рентгеновских камерах высоких давлений позволили получить новые данные о структурных изменениях минералов и связанным с ними перераспределением химических элементов, тем самым объясняя многие различия между составом и строением земной коры и мантии.

ВСЕГДА ЛИ X-ЛУЧИ СПОСОБСТВУЮТ ОТКРЫТИЮ НОВЫХ МИНЕРАЛОВ

Структурные исследования способствуют открытию большого числа новых минералов, неизменно

привлекающих внимание научного сообщества. Однако изучение неизвестного природного соединения иногда приводит к совершенно непредсказуемым результатам. С одним из таких эпизодов оказались связаны и недавние исследования кристаллографов МГУ. Все началось три года назад, когда в Женевский музей естественной истории был передан красивый образец азурита $\text{Cu}[\text{CO}_3]_2(\text{OH})_2$, найденный в шахте Кап-Гарон в провинции Вар во Франции. В ассоциации с азуритом в образце были установлены кристаллы темно-голубого цвета. Все попытки идентифицировать этот минерал с помощью оптических и рентгенографических методов анализа оказались безуспешными, и никакого сходства ни с известными природными, ни с синтетическими соединениями не было выявлено. Результаты качественного химического анализа, указавшие на присутствие меди и углерода в составе этих кристаллов, привели к заключению о том, что загадочное соединение, скорее всего, может оказаться еще неизвестным водным карбонатом меди. Заведующий минералогическим отделом музея доктор Х. Сарп, проводивший исследования на этой стадии, не смог вывести его определенную химическую формулу и поэтому обратился в МГУ им. М.В. Ломоносова с просьбой о проведении полного рентгеноструктурного анализа этих кристаллов.

Полученные данные позволили заключить, что исследованное соединение оказалось гидратированной медной солью янтарной кислоты $\text{Cu}(\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_4)\text{H}_2\text{O}$ [4]. В структуре выделяются слои из образованных атомами кислорода псевдотетрагональных пирамид, соединенных четырьмя мостиковыми атомами углерода (рис. 3). Атомы меди размещаются в центре пирамид. Кристаллизация медной соли янтарной кислоты, нетипичной для мира минералов, может объясняться тем, что коллекционер, передавший образец азурита в музей, предварительно промыл его стиральным порошком W5 производства Страсбургской компании LIDL. В ответ на наш вопрос о составе моющего средства компания сообщила, что это коммерческая тайна. Вместе с тем было высказано предположение, что оно содержало янтарную кислоту $\text{H}_2[\text{OOCCH}_2-\text{CH}_2\text{COO}]$, которая и определила окончательный состав изученных кристаллов. Это утверждение основывалось на том факте, что органические кислоты, входящие в состав стиральных порошков, усиливают их гидротропные свойства. Использование янтарной кислоты в этом производстве оправдано еще и тем, что по сравнению с другими кислотами, содержащими больше атомов углерода, янтарная кислота обладает лучшей растворимостью. Кроме того, она относительно дешева, а одинарная связь между двумя метиленовыми группами CH_2 делает ее химически менее активной в сравнении с другими органическими кислотами.

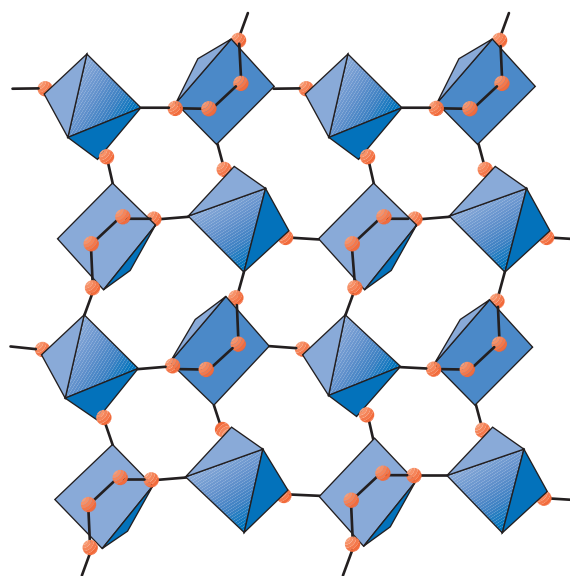
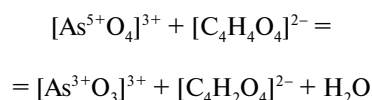


Рис. 3. Структура водной Cu-соли янтарной кислоты: Cu-полуоктаэдры, выделенные синим цветом, соединены мостиками из четырех атомов углерода (красные кружки)

Интересно отметить, что другой медьсодержащий минерал — олівениит $\text{Cu}[\text{AsO}_4](\text{OH})$, обработанный тем же стиральным порошком, превратился в водный малеат меди $\text{Cu}(\text{C}_4\text{H}_2\text{O}_4)\text{H}_2\text{O}$, идентичный исследованным прежде синтетическим кристаллам. Возможная в этом случае реакция изменяет степень окисления As^{5+} в результате частичной дегидратации янтарной кислоты в соответствии с уравнением



Таким образом, малеат меди может быть получен в результате реакции мышьяксодержащих Cu-минералов с янтарной кислотой. Структура продукта указанной выше реакции была изучена Г. Мамми из отдела минералогии научного центра CSIRO в Мельбурне (Австралия), который получил высокоточные структурные данные, но ему повезло меньше, так как структура Cu-малеата в отличие от структуры Cu-соли янтарной кислоты была к тому времени уже известна.

Коллекционерам и любителям минералов в этой связи можно дать практический совет: никогда не промывайте минералы стиральным порошком. Эти вещества химически активны, а их реакции с минералами могут привести к образованию органических соединений, которые никогда не кристаллизуются в природе.

НОВЫЕ ПОДРАЗДЕЛЕНИЯ СИСТЕМАТИКИ МИНЕРАЛОВ

Хорошо известно, что российская школа структурной минералогии в значительной степени сформировалась на основе изучения кристаллических структур силикатов, большинство которых характеризуется простыми и усложненными комбинациями из $[\text{SiO}_4]$ тетраэдров. Лишь сравнительно небольшая группа высокобарических силикатов (~20 соединений) содержит Si-октаэдры. Кроме того, недавно обоснована ранее установленная лишь в кремнийорганических соединениях пятерная координация кремния в вязких силикатных расплавах, а одновременно пятерная и шестерная – в высокобарических щелочных силикатных стеклах. Интерес к кристаллохимии силикатов связан не только с их широким распространением в горных породах, но и с исключительным разнообразием построек из тетраэдров, которые выявлены в их структурах и изучение которых внесло значительный вклад в развитие научных представлений об общих принципах неорганической кристаллохимии.

Результаты структурных расшифровок силикатов, выполненные в последние годы, существенно дополняют их кристаллохимическую систематику, будят воображение исследователей и заставляют искать новые подходы к интерпретации и более глубокому пониманию законов организации атомов в кристаллических структурах.

Хотя темп открытия новых конфигураций из $[\text{SiO}_4]$ тетраэдров в настоящее время замедлился, сравнительно недавно было установлено несколько новых типов, относящихся к основным структурным категориям. Так, набор островных кремнекислородных комплексов в результате расшифровки структуры K,Na,Y-силиката ашкрофтина пополнился уникальным по своим размерам замкнутым полианионом $[\text{Si}_{48}\text{O}_{128}]$, состоящим из 48 Si-тетраэдров. Если аппроксимировать Si-тетраэдры как вершины, то образуемый ими полиэдр представляет собой кубооктаэдр со скошенными вершинами (рис. 4, а), относящийся к 13 полуправильным телам Архимеда – многогранникам с равными ребрами и разнотипными гранями.

Другой гигантский островной комплекс в виде 18-членного кремнекислородного кольца (рис. 4, б) был выявлен в структуре нового минерала мегациклита $\text{KNa}_8[\text{Si}_9\text{O}_{18}(\text{OH})_9]19\text{H}_2\text{O}$. До этого кольца такого размера были установлены лишь в цеолитных структурах, например VPI-5 (название этого цеолита определяется аббревиатурой научного центра – Вирджинского политехнического института, где он был впервые синтезирован).

Среди открытых в последнее время одномерных (Si, O)-комплексов (рис. 5) выделяются новые типы двойных тетраэдрических лент $[\text{Si}_8\text{O}_{21}]$ (рис. 5, а), которые представляют собой результат объединения двух одинарных, образованных четверными те-

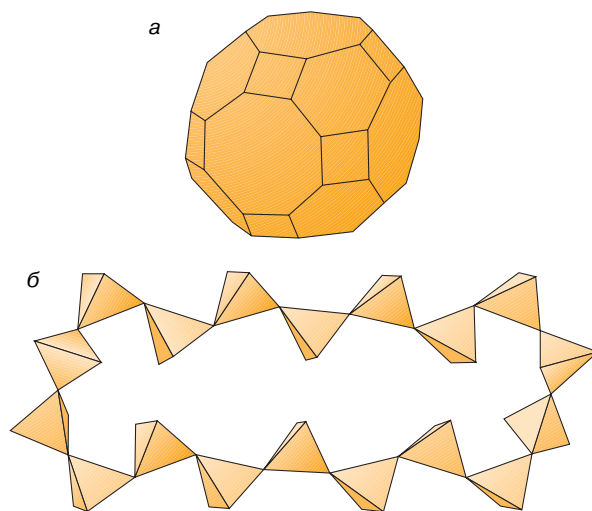


Рис. 4. Новые островные комплексы в структурах силикатов: а – кубооктаэдр со скошенными вершинами, соответствующими центрам (Si, O)-тетраэдров в структуре ашкрофтина; б – кольцо из 18 (Si, O)-тетраэдров в структуре мегациклита

траэдрическими кольцами и ранее установленных в структуре Ti-силиката власовита. Такие ленты содержатся в структурах щелочного силиката ревдита, а также синтетических силикатов $\text{Cs}_4(\text{NbO})_2[\text{Si}_8\text{O}_{21}]$ и $\text{K}_4(\text{NbO})_2[\text{Si}_8\text{O}_{21}]$. Расшифровку структуры K,Nb-силиката предполагалось провести на основе данных по ранее опубликованному Cs,Nb-аналогу. Однако довольно неожиданно оказалось, что ребро а его элементарной ячейки увеличено в 5 раз. Постепенно выяснилось, что структура K,Nb-силиката характеризуется так называемой *модуляцией*. Это кристаллохимическое явление заключается в том, что под влиянием различного рода физико-химических воздействий (в данном случае замены более крупного Cs на более мелкий K) часть атомов остается на своих местах, тогда как другая часть атомов несколько смещена по отношению к первой. Последствия таких неравноценных смещений в структуре K,Nb-силиката показаны на рис. 6, где хорошо видно, как вдоль оси а меняется разворот $[\text{SiO}_4]$ тетраэдров, вызывая увеличение периодичности вдоль этого направления.

Другой новый тип одномерных (Si, O)-комплексов установлен в 1997 году в структуре Ca,U-силиката хейвиита $\text{Ca}(\text{UO}_2)_2[\text{Si}_5\text{O}_{12}(\text{OH})_2]5\text{H}_2\text{O}$. В его основе – также четверные кольца из SiO_4 тетраэдров, однако они объединяются в цепочки с помощью дополнительных одиночных тетраэдров (рис. 5, в). Присутствие четверных колец как основного элемента тетраэдрической цепочки (рис. 5, в) делает структуру хейвиита близкой власовиту $\text{Na}_4\text{Zr}_2[\text{Si}_8\text{O}_{22}]$ и нордиту $\text{Na}_3\text{SrCeZn}[\text{Si}_6\text{O}_{17}]$. Вместе с тем во власовите четверные кольца непосредственно объединены между собой (рис. 5, б), а в нордите в их контакте

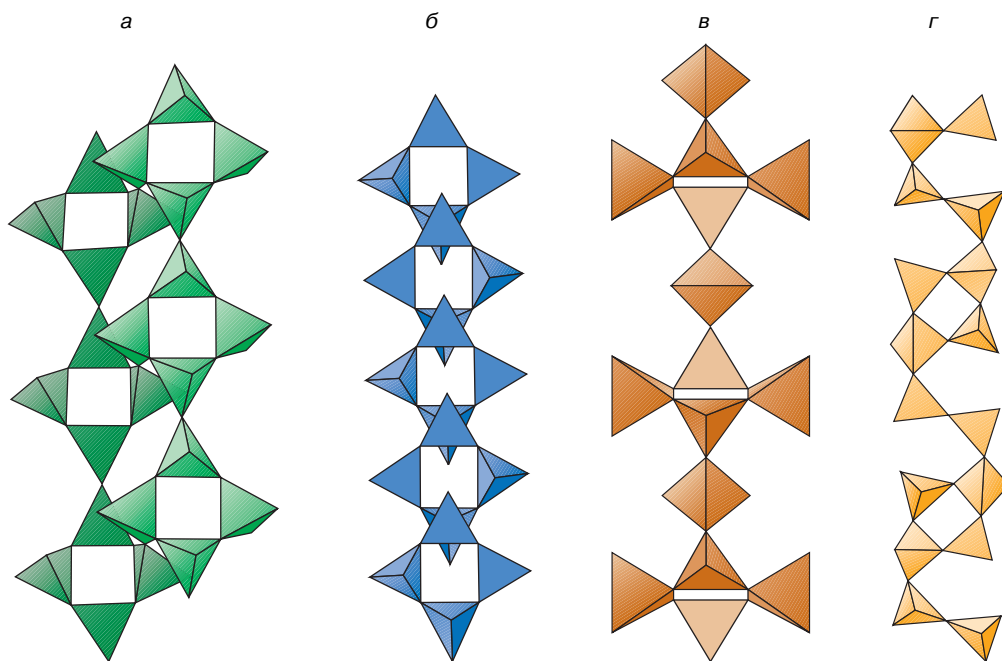


Рис. 5. Кремнекислородные тетраэдрические ленты из четверных колец в структурах $Cs_4(NbO)_2[Si_8O_{21}]$ (а), влассовита (б), хейвиита (в) и нордита (г)

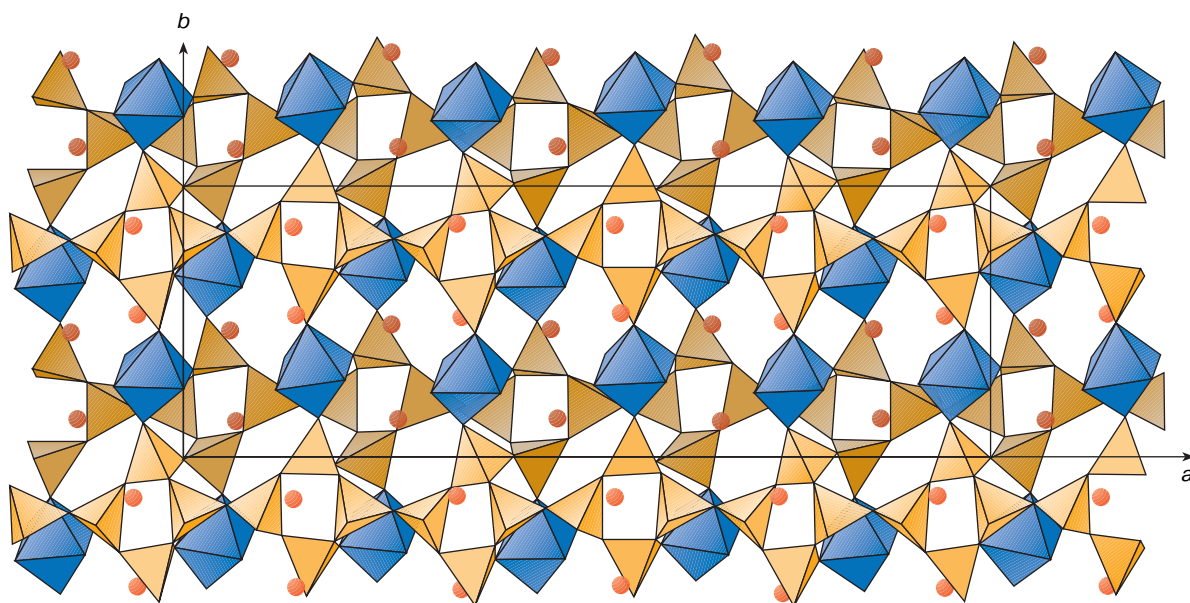


Рис. 6. Структура $K_4(NbO)_2[Si_8O_{21}]$ в проекции вдоль оси *c*. Коричневым цветом выделены Si-тетраэдры; атомы Nb расположены в центрах синих октаэдров; красными кружками обозначены позиции атомов К. Вдоль оси *a* заметен разворот тетраэдров $[SiO_4]$, определяющий модуляцию всей структуры

участвуют диортогруппы $[Si_2O_7]$ из двух связанных через общую вершину тетраэдров (рис. 5, з).

Даже после краткого обзора новых кремнекислородных комплексов нельзя не отдать должное их

удивительному разнообразию. Их открытие в структурах минералов иногда позволяет допустить совпадение движущих сил природы и замыслов человека в создании прекрасного. Эту идею недавно

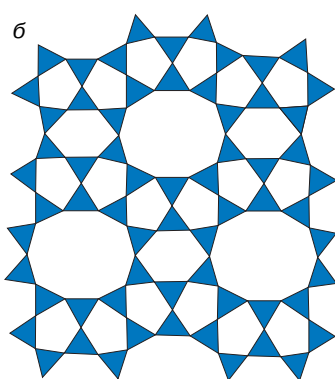
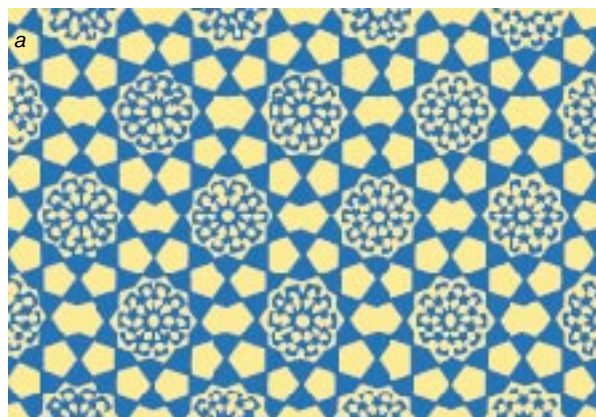


Рис. 7. Фрагмент орнамента мавзолея Маджи и Джами в Исфахане (а); проекция тетраэдрического (Si, Al)-каркаса в структуре ферриерита (б)

убедительно подтвердил Р. Грамлих-Майер, продемонстрировав подобие орнамента древнего персидского мавзолея Маджи и Джами (рис. 7, а) со структурой ферриерита — одного из представителей группы цеолитов (рис. 7, б). И очевидно, что впереди у кристаллографов еще немало новых элегантных и загадочных мотивов, которые будут открыты в силикатных структурах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрены наиболее современные подходы к решению структурно-минералогических проблем, связанных с открытием новых минералов и исследованием их трансформаций при изменении

физико-химических условий. В целом же XX век можно считать золотым для рентгеновской кристаллографии, результаты которой расширили научные представления по многим направлениям современного естествознания. 14 работ, связанных с X-лучами и их использованием для изучения кристаллов, были удостоены Нобелевских премий [5]. Как известно, за минералогические исследования эти премии не присуждаются, однако несомненно, что новые структурные данные о минералах являются весомым вкладом в научное наследство, передаваемое ученым XXI века, и можно надеяться, что оно будет воспринято ими с уважением и признательностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пушаровский Д.Ю. Структурная минералогия силикатов и их синтетических аналогов. М.: Недра, 1986. 160 с.
2. Hazen R.M., Finger L.W. Comparative Crystal Chemistry: Temperature, Pressure, Composition and the Variation of Crystal Structure. L.: Wiley, 1982. 231 p.
3. Knittle E., Jeanloz R. // Science. 1987. Vol. 235, № 4789. P. 668–670.
4. Rastvetaeva R.K., Pushcharovsky D.Yu., Furmanova N.G., Sarp H. // Zeitschr. Kristallogr. 1996. Bd. 211. S. 808–811.
5. Виноградов А.В. // Вестн. РФФИ. 1996. № 4. С. 55–63.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Гласкер Дж., Трублад К. Анализ кристаллической структуры. М.: Мир, 1974. 236 с.
2. Ковба Л.М., Трунов В.К. Рентгенофазовый анализ. М.: Изд-во МГУ, 1976. 231 с.
3. Шафрановский И.И. Кристаллография в СССР, 1917–1991. СПб.: Наука, 1996. 192 с.

* * *

Дмитрий Юрьевич Пушаровский, доктор геолого-минералогических наук, профессор геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, академик РАЕН. Автор семи монографий и более 250 научных статей.