

## DISCOVERY AND SYSTEMATICS OF MINERALS

D. Yu. PUSHCHAROVSKY

*The results of the studies related to the discovery of new minerals are summarized. The increase in the number of minerals since 1800 is discussed and their names are explained. Modern XRD databases, which contributed to the discoveries of new minerals are reviewed and new approaches to mineral classification are considered.*

**Рассмотрены результаты исследований, связанные с открытием новых минералов. Приведена динамика роста числа минералов с 1800 года и дано объяснение их названий. Проанализировано современное состояние баз рентгенографических данных, способствующих открытию новых минералов, и рассмотрены различные подходы к систематике минералов.**

© Пуцаровский Д.Ю., 1999

## ОТКРЫТИЕ И СИСТЕМАТИКА МИНЕРАЛОВ

Д. Ю. ПУЦАРОВСКИЙ

Московский государственный университет  
им. М.В. Ломоносова

### ВВЕДЕНИЕ

XX век ознаменован огромным прогрессом в развитии научных представлений о минералах [1]. До 1800 года было известно менее 100 самостоятельных минеральных видов. Начиная с этого рубежа темп открытия новых минералов непрерывно растет. Так, за период с 1800 по 1819 год было открыто 87 минералов. Затем с 1820 по 1919 год за каждые 20 лет регистрировалось в среднем по 185 минералов. В период с 1920 по 1939 год было описано 256 новых минералов, а с 1940 по 1959 год – 342. С 1960 года ежегодно открываются 40–50 новых минералов, и, таким образом, уже сейчас общее число установленных на Земле минералов превысило 4000 (рис. 1). Среди них лишь 20–30 минералов, главнейшие из которых – кварц, полевой шпат и роговая обманка, слагают 99,5% земной коры, а остальные встречаются относительно редко. При этом большая часть известных минералов образуется в приповерхностных условиях, 200 являются продуктами глубинных магматических процессов, а около 1000 связано с химическими реакциями, в которых участвуют нагретые подземные воды (гидротермальные растворы) [2]. Совершенствование научных методик и аппаратуры способствует углублению минералогических исследований. Так, на месторождении Сан-Марио-Мин (Франция), занимающем около 30 км<sup>2</sup>, в начале XX века было описано 53 минерала, а спустя 80 лет – уже 140. В.В. Ляхович выявил в гранитах

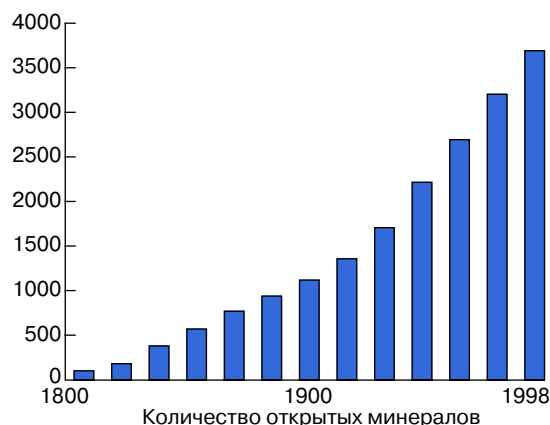


Рис. 1. Рост числа минеральных видов в течение XIX–XX веков

кроме восьми главных породообразующих минералов еще 56 более редких, причем в результате анализа 1 кг раздробленного гранита было найдено лишь 25 минералов, а в образцах с общей массой 116 кг, собранных с поверхности 400 м<sup>2</sup>, установлено 46 различных минералов. Подобные данные позволили французским исследователям Ж. Буйе и А. Кайо прийти к выводу, что общее число минералов ( $N$ ), находящихся на той или иной площади ( $S$ ), определяется соотношением  $N = 7,5 \cdot S^{0,18}$  (где  $S$  – площадь, измеряемая в м<sup>2</sup>). Приведенная формула справедлива в широком интервале значений  $S$ , меняющихся от 10 мм<sup>2</sup> до размеров всей свободной ото льдов площади земной поверхности, находящейся над уровнем моря и составляющей около  $134 \cdot 10^6$  км<sup>2</sup>.

## СКОЛЬКО МИНЕРАЛОВ НАЙДЕНО НА ЗЕМЛЕ И ЛУНЕ

Как уже отмечалось, в настоящее время на Земле открыто около 4000 минералов. По сравнению с 89 минералами, установленными на Луне, это количество, безусловно, значительно, но по сравнению с числом возможных сочетаний примерно из 90 химических элементов, устойчивых в природе, это число не очень велико. Конечно, численное превосходство земных минералов над лунными имеет свои причины. Сопоставляя эти величины, надо иметь в виду, что масса лунных пород, доставленных на Землю двумя российскими космическими кораблями “Луна” и шестью американскими кораблями “Аполлон”, не превышает 380 кг. Это относительно немного, а число минералов, как отмечено выше, растет пропорционально анализируемой массе и площади, с которой они собраны.

Важным фактором, ограничивающим разнообразие лунных минералов, является отсутствие воды в химическом составе Луны. До сих пор на Луне не установлено водосодержащих минералов, и лишь в одном – гетите FeOОН присутствуют гидроксильные группы. Наоборот, примерно для половины минералов, известных на Земле, характерно участие в их составе молекул воды и ОН-групп. К водосодержащим минералам относятся ~75% фосфатов, 65% карбонатов и около 50% силикатов [3].

## ПОЧЕМУ УЧЕНЫЕ ОХОТЯТСЯ ЗА НОВЫМИ МИНЕРАЛАМИ

Следует подчеркнуть, что и в настоящее время открытие нового минерала является событием в науке. Созданные природой химические соединения расширяют наши представления о формах концентрации химических элементов не только на Земле, но и на других планетах, а также о способах объединения атомов в кристаллических структурах. Анализируя состав, структуру, физические свойства минералов, их соотношения с другими минеральными видами можно воссоздать историю формирования вмещающих горных пород. Многие из открываемых

минералов находят и практическое применение. Сейчас трудно представить, что еще 30 лет назад не был известен один из красивейших минералов – чароит  $K_2NaCa_4[Si_{10}O_{25}]F$ , изделия из которого теперь можно найти во многих странах мира (рис. 2). Наконец, открытие нового минерала вносит вклад в минералогическую систематику, которая будит воображение исследователя и помогает выявить параметры, способствующие установлению связей между составом, структурой и физическими свойствами.

Следует особо отметить, что разнообразие геологических и геохимических обстановок на территории России – фактор, благоприятствующий находкам различных минералов. В качестве примера можно привести щелочные породы Кольского полуострова и Карелии, в которых установлено около 500 минералов. Это количество заметно больше числа минералов, установленных в крупнейших минералогических заповедниках мира: Стерлинг (США) – 260, Лангбан (Швеция) – более 200, Цумеб (Намибия) – более 150, Ильменские горы (Россия) – 145, Пршибрам (Чехия) – 108.

Каждый предположительно новый минерал всесторонне анализируют, после чего данные о его составе, структурных особенностях и физических свойствах направляют в комиссию по новым минералам Международной минералогической ассоциации. Одновременно исследователь, нашедший новый минерал, предлагает комиссии свой вариант его названия, которое принимают или отвергают путем тайного голосования.



**Рис. 2.** Чароит из Мурунского массива, Якутия (коллекция М. Евдокимова, фото М.Б. Лейбова; с разрешения редакции журнала “Мир камня”)

## ЧТО ОЗНАЧАЮТ НАЗВАНИЯ МИНЕРАЛОВ

Обзор утвержденных минеральных видов показывает, что названия примерно 40% из них образованы от фамилий, а иногда и просто имен каких-либо людей [1]. Впервые такие названия начали появляться в конце XVIII века. Первым, кто ввел в минералогии персональные названия, был немецкий минералог Авраам Вернер (1750–1817), который внес большой вклад в создание минералогии как самостоятельной науки. Это нововведение было воспринято многими исследователями не слишком благожелательно. Критика использования персональных названий для минералов продолжается и сейчас. Основным ее аргументом является то, что такие названия никак не связаны со свойствами или какими-либо другими особенностями минералов. Подобная практика, по мнению известного украинского минералога А.С. Поваренных, была оправданна, когда финансирование науки почти целиком зависело от благосклонности аристократов, как это было в Германии, России и некоторых других странах.

Хотя имена некоторых из этих людей стали основой для названий ряда минералов, все же в большинстве названий увековечены имена ученых, и в первую очередь тех, которые связаны с изучением Земли. Это минералоги, кристаллографы, геологи, петрологи, геохимики, горные инженеры, а также коллекционеры и торговцы минералами. Есть минералы, названные в честь ученых других специальностей – химиков, физиков, математиков, астрономов, медиков, а также в честь писателей, поэтов, философов, путешественников, политических деятелей. Например, фосфат беловит  $(\text{Sr}, \text{Ba})_3\text{Na}(\text{La}, \text{Ce})[\text{PO}_4]_3(\text{F}, \text{OH})$  назван в честь академика Н.В. Белова, который основал российскую школу рентгеноструктурного анализа, а Са-борат Colemanит  $\text{CaB}_2\text{O}_4(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  – в честь американского коммерсанта У. Коллемана, основателя промышленности по добыче бора в Калифорнии. Один из широко распространенных слюдяных минералов – биотит  $\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_3(\text{Al}, \text{Fe})\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{F})_2$  назван в честь французского физика Жана Батиста Био, изучавшего магнетизм и оптику и совместно с Д. Брюстером, открывшим в кристаллах оптическую двуосность. К этой группе можно отнести и минералы, названные в честь В. Рентгена, описавшего в 1895 году новый вид электромагнитных волн, П. Кюри, открывшего полоний и радий, А. Беккереля, установившего радиоактивность урана и его солей.

Некоторые минералы названы в честь исследователей и путешественников, а также в честь космонавтов, исследовавших Космос и Луну. Так, структурно связанный с флюоритом  $\text{CaF}_2$  гагаринит  $\text{NaCaREEF}_6$  (*REE* – редкоземельный катион) назван в честь Ю.А. Гагарина – первого человека, совершившего в 1961 году полет в Космос. Са, Zr-силикат армстронгит  $\text{CaZrSi}_6\text{O}_{15} \cdot 2,5\text{H}_2\text{O}$  назван по

имени Нила Олдена Армстронга, американского космонавта, впервые ступившего в 1961 году на поверхность Луны.

Чести быть увековеченными в названиях минералов удостоиваются не только ученые, но и личности, известные своими достижениями в других сферах человеческой деятельности. Например, гетит  $\text{FeOON}$  назван в честь И. фон Гёте (1749–1832), немецкого писателя, поэта и философа, который неизменно интересовался минералами и даже подарил в 1797 году одну из коллекций музею Санкт-Петербургского горного института. Некоторым минералам присвоены имена президентов США (джеферсонит, рузвельтит), первого премьер-министра Австралии Х.Э. Холта (холтит) и других политических деятелей. В 1998 году опубликованы данные по найденному на Чукотке минералу сороситу  $\text{Cu}(\text{Sn}, \text{Sb})$ , открытому российскими, финскими и украинскими исследователями и названному в честь Дж. Сороса, основателя Международного научного фонда, поддержка которого чрезвычайно важна для ученых из республик бывшего Советского Союза [4].

В последние годы минералам стали все чаще присваивать женские имена. Одно из них – эвезит  $\text{Mn}_2\text{AsO}_4\text{OH}$ , посвящено прародительнице человеческого рода Еве. Это название было придумано после того, как уже был открыт адамин  $\text{Zn}_2\text{AsO}_4\text{OH}$ , правда названный не в честь Адама, возлюбленного Евы, а в честь Ж.Ж. Адама (1795–1881), французского минералога, предоставившего для исследования первый образец этого минерала. Название У-силиката склодовскита происходит от девичьей фамилии М. Кюри (Склодовская), так как к тому моменту название минерала кюрит  $\text{Pb}_3\text{U}_5\text{O}_{17} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  уже было связано с именем ее мужа П. Кюри. Арсенат ртуты чурсинит назван в честь киноактрисы Л. Чурсиной. Известный швейцарский минералог Х. Сарп посвятил один из открытых им минералов своей жене Шанталь (шанталит  $\text{CaAl}_2\text{SiO}_4(\text{OH})_4$ ). Лонсдейлит, модификация углерода, найденная в местах падений метеоритов, была названа в честь известного английского кристаллографа Кэтлин Лонсдейл, преподававшей этот предмет Маргарет Тэтчер, будущему премьер-министру Великобритании.

Названия минералов по местам их находок составляют вторую по численности группу. Некоторые из них используются с древности, как, например, магнетит  $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}\text{O}_4$ , названный по Магнезии – стране, граничившей с древней Македонией. В качестве примеров подобных названий можно указать везувиан  $\text{Ca}_{10}\text{Mg}_2\text{Al}_4[\text{SiO}_4][\text{Si}_2\text{O}_7]_2(\text{OH})_4$ , найденный на горе Везувий (Италия), или ильменит  $\text{FeTiO}_3$ , найденный в Ильменских горах на Урале. Многие названия минералов связаны со странами, где они были впервые установлены. Среди них сульфид кубанит  $\text{CuFe}_2\text{S}_3$ , а также силикаты иракит и суринамит. Минерал арагонит, ромбическая полиморфная

форма  $\text{CaCO}_3$ , из которой состоит жемчуг, назван в честь испанской провинции Арагон.

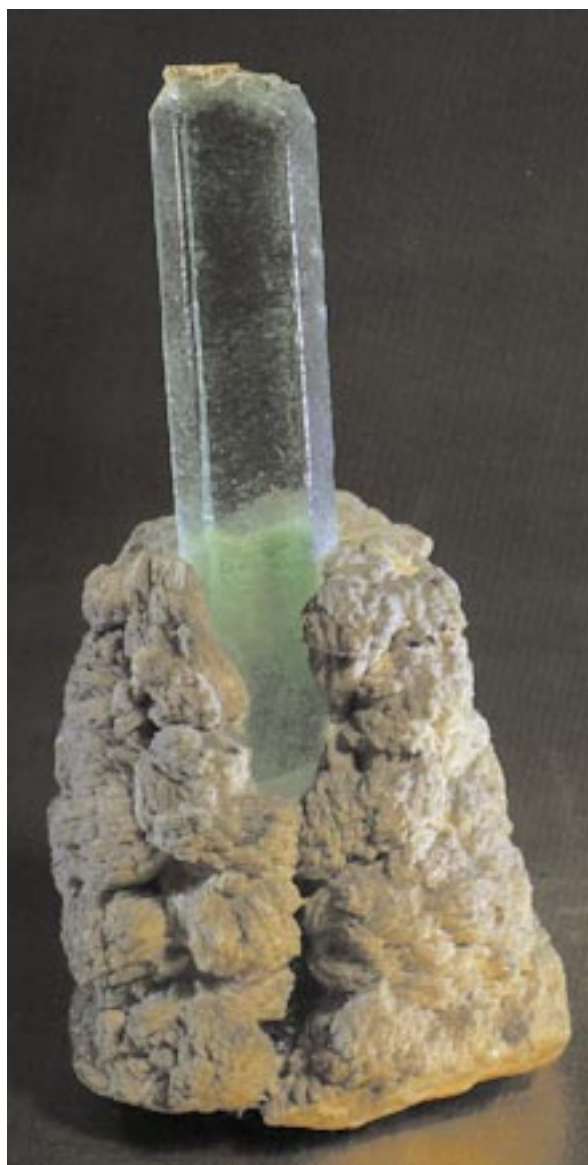
Иногда минералы характеризуются довольно необычными названиями. Примером такого рода может служить транквиллитиит, минерал, который открыт в породах, собранных в море Спокойствия на Луне в ходе экспедиции космического корабля “Аполлон-11”. Открытый в 1971 году Na, Mn-силикат раит  $\text{Na}_3\text{Mn}_3\text{Ti}_{0,25}[\text{Si}_8\text{O}_{20}](\text{OH})_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ , структура которого была определена лишь в 1997 году с использованием синхротронного излучения, назван в честь международной экспедиции (1969–1970) на папирусной лодке “Pa” под руководством норвежского путешественника Тура Хейердала.

Вместе с тем не всегда можно найти логику в присваиваемых минералам названиях. Так, вполне естественно предположить, что стронцианит  $\text{SrCO}_3$  — минерал, получивший название в связи с присутствием в его составе стронция. Однако этот минерал был назван по месту его находки в районе Строншиан, в Шотландии. Позже было установлено, что в нем содержится неизвестный в то время элемент, которому впоследствии было присвоено название стронций. Таким же образом ранее неизвестный химический элемент, открытый в берилле,  $\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$  (рис. 3) получил название бериллия. Среди наиболее крупных кристаллов различных минералов кристалл берилла, найденный на о-ве Мадагаскар, обладает рекордными размерами. Его длина — 18 м, диаметр — 3,5 м, а масса достигает 380 т.

Некоторые из интересных названий минералов навеяны сходством их окраски и формы с растениями или их семенами. Например, название всем хорошо знакомого полудрагоценного камня малахита  $\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$  происходит от греческого слова мальва, ярко-зеленый цвет листьев которого напоминает цвет малахита. Название другого ювелирного камня — граната происходит от латинского слова, обозначающего плод гранатового дерева, зерна которого по форме близки кристаллам граната.

Довольно необычными и потому хорошо запоминающимися являются названия минералов, производные от имен героев мифов и легенд. Например, встречающаяся в Испании (Альмаден), Калифорнии и других странах в самородном виде ртуть (англ. *mercury*) названа за свою подвижность по имени римского бога Меркурия, а Ti-силикат нептунит — по имени римского бога моря Нептуна.

Предложениям о названиях новых минералов предшествует большая исследовательская работа, связанная с изучением состава, а также различных физических свойств (формы и симметрии кристаллов, их цвета, твердости, оптических характеристик и т.д.) предположительно нового минерального вида. Собственно на этой основе и шло выделение новых минералов вплоть до конца 30-х годов XX века. С того периода в науку вошел новый мощный аналитический метод, основанный на дифракции



**Рис. 3.** Кристалл берилла  $\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$  в полево шпате (коллекция Уральского геологического музея, фото М.Б. Лейбова; с разрешения редакции журнала “Мир камня”)

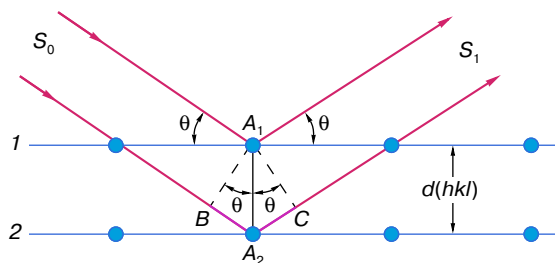
рентгеновских лучей кристаллами природных и синтетических соединений.

## РЕНТГЕНОВСКАЯ ДИАГНОСТИКА МИНЕРАЛОВ

После демонстрации в 1912 году М. Лауэ и У.Л. и У.Г. Бреггами рентгеновской дифракции минералы стали первыми кристаллическими материалами, которые были исследованы этим методом. В настоящее время рентгенографический анализ кристаллов — один из основных методов изучения состава и структуры минералов и синтетических соединений.

Вскоре после открытия рентгеновской дифракции рентгенография быстро доказала свое неоспоримое преимущество в решении многих задач, в том числе в идентификации вещества, по сравнению с химическим анализом и оптической микроскопией. Получаемая на основе рентгенографии информация во многих случаях не может быть достигнута другими аналитическими методами столь же быстро и с той же точностью. Именно поэтому рентгенография стала все шире использоваться при производственном анализе руд, сплавов, синтетических материалов, полупроводников, продуктов металлургии, а также керамической, цементной и химической областей промышленности.

Особенность рентгенографического анализа кристаллических образцов заключается в его многоцелевом назначении, позволяющем решать разные задачи, важнейшей из которых остается качественный анализ или идентификация исследуемого вещества. Основы метода были заложены У.Г. Бреггом, предложившим рассматривать дифракцию в кристалле рентгеновских лучей как отражение от полупрозрачных плоскостей-зеркал, предположительно образованных атомами. Если система параллельных плоскостей в кристалле наклонена по отношению к пучку X-лучей, то при ее определенной ориентации волны, отраженные от соседних плоскостей, усилят друг друга (см. рис. 2). Условие этого усиления – разность хода лучей, отраженных соседними плоскостями, равна целому числу длин волн или, как следует из рис. 4:  $2d\sin\theta = n\lambda$ , где  $d$  – межплоскостное расстояние;  $\theta$  – угол между пучком X-лучей и плоскостью;  $\lambda$  – длина волны X-луча;  $n$  – целое число. С использованием этой формулы на основе дифракционной картины кристалла можно для каждого вещества получить набор характерных для него межплоскостных расстояний ( $d$ ). Эти величины, а также интенсивности отраженных от этих плоскостей рентгеновских лучей ( $I$ ), которые фиксируются на фотопленке или специальными детекторами, являются основой для проведения диагностики исследуемого вещества.



**Рис. 4.** Отражение рентгеновских лучей от двух соседних атомных плоскостей, расстояние между которыми равно  $d$ .  $\theta$  – угол между рентгеновским лучом и атомной плоскостью. Разность хода между лучами, отражаемыми двумя соседними плоскостями:  $BA_2 + A_2C = 2d\sin\theta = n\lambda$

Успешная диагностика неизвестного минерала прежде всего связана с наличием достаточного количества стандартных справочных данных, содержащих величины  $I$  и  $d$ . Необходимость создания для этой цели библиотек справочных данных была понята сразу же после получения первых рентгенограмм. Так, еще в 1919 году американский исследователь Хелл выявил на основе анализа рентгеновского снимка, что считавшийся до этого химически чистым NaF на самом деле содержал примесь  $NaHF_2$ . Однако первые такие библиотеки появились лишь в 1938 году, когда американский исследователь Дж. Ханавальт с соавторами опубликовал статью, посвященную идентификации веществ на основе рентгенофазового анализа и содержащую рассчитанные порошковые рентгенограммы для 100 соединений. Каждая порошковая рентгенограмма стала рассматриваться как “отпечаток пальцев” химического соединения. После этого Американское общество по исследованию материалов (ASTM) провело работу по систематизации структурных данных, и в 1941 году при участии ASTM известные к тому времени рентген-дифракционные спектры были изданы в форме картотеки с ключом для поиска, схема которого была предложена Дж. Ханавальтом. Ключ включал данные по трем самым интенсивным отражениям, химическую формулу и номер карточки с полной информацией по данному соединению. В последующие годы картотека расширилась до 2500 соединений. Для ее пополнения впоследствии под эгидой ASTM был организован комитет, которому стали оказывать содействие научные организации Великобритании, Франции и Канады. Вскоре комитет приобрел функции международной организации, а в 1969 году стал полностью самостоятельным. Созданная им картотека стала называться “Порошковая дифракционная картотека объединенного комитета порошковых дифракционных стандартов” (PDF JCPDS). В 1978 году 14 международных и национальных научных обществ, в первую очередь США, Германии, Канады, Австралии, Франции, Великобритании и Японии, под эгидой Международного союза кристаллографов учредили ICDD – Международный центр дифракционных данных. Началом создания базы данных ICDD – PDF-2 считается 1940 год. Она состоит из двух независимых частей, включающих сведения о неорганических и органических соединениях соответственно. С 1985 года рентгеновские данные по всем охарактеризованным этим методом соединениям стали доступны в компьютерной форме. Для получения этих данных в настоящее время используются приборы, получившие название рентгеновских дифрактометров. Число этих приборов, установленных в исследовательских лабораториях в разных странах в начале 1998 года, достигло 45 тыс., а число исследователей, использующих эту аппаратуру, оценивается в 1 млн человек.

Принцип формирования картотеки рентгеновских данных хронологический. С 1957 года начался ежегодный выпуск сетов, в которых объединяются рентгеновские данные по разным соединениям, полученные в текущем году. Начиная с 18-го тома, каждый последующий содержит данные по 1500 неорганических соединений. К 1998 году 47 сетов содержали информацию приблизительно о 106 тыс. соединений, причем темп пополнения этой картотеки непрерывно растет и в настоящее время составляет ~2500 соединений в год (~80% – неорганические соединения, а 20% – органические). Одновременно с ежегодным пополнением картотеки ведется работа по комплектации ее выбором. В разные годы издавались данные по минералам, металлам и сплавам, по наиболее распространенным соединениям.

Расширение объема рентгенографической информации привело к созданию баз данных, которые теперь распространяются на компакт-дисках. Центром хранения такой информации по неорганическим соединениям является Институт неорганической химии Университета Бонна, а по органическим соединениям – структурный банк Кембриджа. В базе данных по кристаллическим структурам неорганических соединений (ICSD – Inorganic Crystal Structure Database) Университета Бонна на начало 1998 года содержались сведения о 37 800 соединениях. Связь между обоими банками рентгенографических данных (ICDD и ICSD) открывает путь к использованию общей имеющейся в их распоряжении информации, и приведенная выше цифра 106 тыс., характеризующая число порошковых рентгеновских спектров в PDF-2, включает и базу данных ICSD. Сама база PDF-2 насчитывает на начало 1998 года сведения по 65 907 соединениям, в том числе 47 800 порошковых спектров относятся к неорганическим, а 19 400 – к органическим соединениям. Область использования баз данных значительно расширяется благодаря тому, что на основе содержащихся в них сведений можно получить на дисплее компьютера объемное изображение, а также любое сечение структуры рассматриваемого вещества.

## НОВЫЕ ПОДХОДЫ К СИСТЕМАТИКЕ МИНЕРАЛОВ

Обычно вслед за открытием нового минерала исследователь пытается определить его место среди ранее известных минеральных видов. Классификация минералов развивалась на протяжении столетий, а критерии, положенные в ее основу, изменялись по мере развития минералогии. В древние эпохи в основе систематики минералов лежали области их практического использования. Таким образом, в IV–III веках до нашей эры начиная с древнегреческого философа и естествоиспытателя Теофраста и вплоть до I века н.э. (римский ученый Г. Плиний) минералы разделялись на драгоценные камни, руды, краски и т.д. В средние века арабский

ученый Гебер (Джабир ибн Хайяна, 721–803) предложил систематику, основанную на внешнем облике кристаллов и их физических свойствах, таких, как твердость, температура плавления, растворимость, спайность и др. Впоследствии эта физическая классификация, дополненная Авиценной (Абу Али Ибн Сино, 980–1037) и Г. Агриколой (1494–1555), просуществовала вплоть до середины XVIII века.

Шведский минералог и химик А.Ф. Кронстедт (1722–1765), известный своими работами по систематике цеолитов, был одним из первых, указавшим в 1758 году на важное значение для систематики минералов их химических особенностей, и в частности присутствия в их составе определенных химических элементов. Несколько позже, в 1819 году, Й.Я. Берцелиус (1779–1848) предложил разделять минералы по типу химических анионных комплексов (например, хлориды, сульфаты, силикаты), а не минералы цинка, меди, железа и т.д., как было принято раньше. Химическая классификация получила широкое распространение вплоть до начала XX века, когда начиная с 1913 года после первых структурных определений минералов постепенно стали использовать структурные критерии. Таким образом, вступление минералогии в эпоху, характеризующуюся всесторонним изучением кристаллических структур минералов, сопровождается все большей ролью структурных параметров в современных классификациях минералов. Какие же критерии предлагаются в настоящее время для объединения минералов в общие структурные подразделения?

Любая кристаллическая структура представляет собой упаковку атомов, характеризующуюся определенным периодом повторяемости. Каждая конкретная структура описывается позициями атомов внутри элементарного параллелепипеда (элементарной ячейки), их координацией, а также типом межатомных химических связей. Распределение в пространстве химических связей может быть однородным или гетерогенным. Примерами структур с однородным распределением связей являются медь, алмаз и некоторые другие минералы, образованные атомами одного типа с одинаковыми связями вдоль трех координатных осей.

В гетерогенных структурах выделяются атомные группировки, связи внутри которых оказываются более прочными по сравнению с другими межатомными взаимодействиями. Такие атомные группировки называются структурными единицами. Выделение структурных единиц – основа для определения места минерала в структурной классификации.

Структурные единицы характеризуются различной протяженностью в пространстве или, иными словами, различной многомерностью. Они могут быть образованы изолированными атомами, а также изолированными (0-мерными) структурными единицами, состоящими из отдельных координационных полиэдров, объединенных в пары (димеры),

тройки (тримеры) и т.д., а также в кольца. Одномерные структурные единицы имеют форму цепочек, двумерные – слоев, а трехмерные – каркасов. Таким образом, структурные единицы характеризуются четырьмя типами размерности. Первое разделение всех минералов в рамках структурной классификации основывается на так называемых категориях структурных единиц, число которых равно пяти:

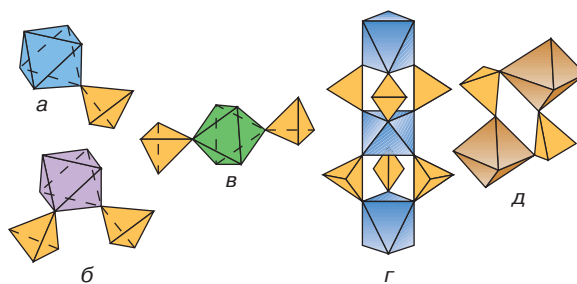
Размерность структурных единиц	Категория структурных единиц
0	Упаковка отдельных атомов. Изолированные полиэдрические комплексы (димеры, тримеры, кольца)
1	Цепочки
2	Слои
3	Каркасы

Нетрудно заметить, что 0-мерные структурные единицы характеризуются двумя категориями. В одну из них объединены так называемые атомные структуры, в которых структурные единицы представляют собой плотноупакованные атомы. При этом связи между ними носят преимущественно ненаправленный характер. Возникающие при такой укладке тетра- и октаэдрические пустоты заселяются более мелкими катионами. Примером такого рода структур может служить перовскит,  $\text{CaTiO}_3$ , в котором крупные атомы Ca и O образуют плотнейшую упаковку, становясь тем самым структурными единицами, а катионы Ti занимают одну четверть октаэдрических пустот.

Следующая категория охватывает изолированные атомные или полиэдрические группы конечных размеров. Структурные единицы такого типа, построенные из  $\text{SO}_4$ -тетраэдров и  $\text{MO}_6$ -октаэдров (M – катион металла) в структурах некоторых сульфатных минералов, изображены на рис. 5. Три оставшиеся категории включают структуры, основные структурные единицы которых имеют форму цепочек, слоев и каркасов. Именно этот подход был недавно использован португальским исследователем Ж. Лима-де-Фариа для систематики 230 структурных типов, характерных для наиболее распространенных породобразующих минералов Земли.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на свою многовековую историю, минералогия продолжает оставаться живой наукой. Ежегодно открывают десятки новых минералов. Минералы являются основными компонентами ве-



**Рис. 5.** Изолированные структурные единицы в структурах сульфатных минералов: а – димеры в минасрагите  $\text{VO}_2\text{SO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ; б – тримеры в ремерите  $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}(\text{SO}_4)_4 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$ ; в – тримеры в бледите  $\text{Na}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ; г – линейный комплекс в кокимбите  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ; д – кольцо из двух  $\text{SO}_4$ -тетраэдров и двух Mg-октаэдров в структуре старкеита  $\text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$

щества Земли и других планет. Поэтому их изучение занимает центральное место в науках о Земле. Несомненно, что впереди у минералогов новые достижения, связанные с исследованиями минерального состава не только земной коры, но и глубинных оболочек Земли. При этом открытие новых минералов и их систематика способствуют генерации новых идей, расширяющих научные представления о составе строения и эволюции земных оболочек.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Митчелл Р.С. Названия минералов. М.: Мир, 1982. 248 с.
2. Пушаровский Д.Ю. // Природа. 1995. № 1. С. 117–118.
3. Супрычев В.А. Самоцветы. Киев: Наук. думка, 1980. 216 с.
4. Barkov A.Y., Laajoki K.V.O., Gornostayev S.S. et al. // Amer. Mineralogist. 1998. Vol. 83, № 7/8. P. 901–906.

\* \* \*

Дмитрий Юрьевич Пушаровский, доктор геолого-минералогических наук, профессор геологического факультета МГУ, действительный член Российской академии естественных наук. Председатель комиссии по классификации минералов Международной минералогической ассоциации. Область научных интересов – рентгеновская кристаллография и структурные принципы минералов и неорганических соединений. В 1997 году швейцарскими минералогами был открыт новый природный арсенат меди, названный пушаровскитом. Автор семи монографий и более 280 научных статей.