

Фамильные минералы нашего института

Р.К.Расцветаева

Институт кристаллографии им.А.В.Шубникова готовился к юбилею. Подводились итоги творческой деятельности большого коллектива. И тут, как нельзя кстати, пришло известие об утверждении Комиссией по новым минералам и названиям минералов Международной минералогической ассоциации нового минерала — икранита. Он назван авторами открытия, Н.В.Чукановым и мной, по аббревиатуре ИКРАН — Институт кристаллографии Российской академии наук. В стенах нашего института выполнены многочисленные исследования кристаллических структур и в частности, икранита. Знаменательное и крайне редкое событие, когда новому природному соединению присваивается имя института, произошло третьего числа третьего месяца третьего года третьего тысячелетия, иными словами 3 марта 2003 г. А началось все 60 лет назад...

Шла война, но Лаборатория кристаллографии АН СССР продолжала свою работу в эвакуации на Урале. Здесь исследовался кварц для оборонной промышленности. После возвращения в Москву «кварцевую» лабораторию преобразовали в самостоятельный институт — тогда един-



Рамиза Кераровна Расцветаева, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник. Специалист в области структурной минералогии.

ственный в мире по комплексному изучению кристаллов. В 1971 г. ИКРАНУ присвоено имя его первого директора — академика А.В.Шубникова, в честь которого был назван и один из новых минералов. Впоследствии минералы называли именами и других сотрудников ИКРАНа.

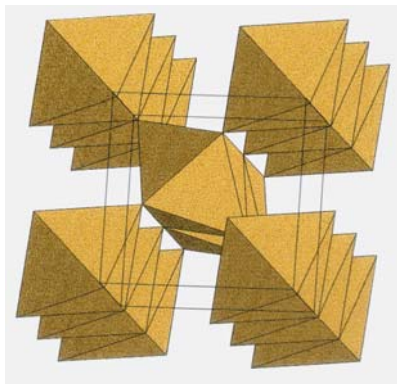
Шубниковит

Этот водный хлорарсенат меди и кальция $\text{Ca}_2\text{Cu}_8(\text{AsO}_4)_6\text{Cl}(\text{OH})\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ обнаружен Е.И.Нефедовым в 1953 г. в зоне окисления месторождения Хову-Аксы в Туве [1]. Шубниковит — редкий минерал красивого бирюзового цвета с шелковистым блеском, с молекулярным весом 1.6 г/см³. К сожалению, его структура до сих-

пор не расшифрована из-за изогнутой тонкопластинчатой формы кристаллов, не дающей шансов на получение современными методами необходимых дифракционных данных. Известны лишь (и то предположительно) ромбическая симметрия кристаллов и приближенные параметры ячейки: $a=14.05$, $b=14.08$, $c=30.0 \text{ \AA}$.

Стишовит

Как правило, минералам присваивают имена маститых ученых, но бывает и по-другому. Стишовит назван в честь никому тогда неизвестного молодого аспиранта Сергея Стишова, только начинавшего свой путь в науке. Почти детективная история открытия минерала увле-



Структура стишовита. Октаэдры $[\text{SiO}_6]$ образуют колонки, которые через кислородные вершины соединяются в трехмерную постройку.

кательно рассказана самим Сергеем Михайловичем на страницах журнала «Химия и жизнь» в двух очерках под названием «Высокое давление» [2]. Здесь мы упомянем лишь ее суть.

В 1961 г. в журнале «Геохимия» была опубликована статья С.М.Стишова и С.В.Поповой [3] об открытии новой плотной (4.28 г/см^3) модификации кремнезема (SiO_2), в которой атом кремния окружен не четырьмя атомами кислорода, как в кварце, а шестью. Вещество было синтезировано Стишовым в Институте физики высоких давлений АН СССР в камере высокого давления из дробленного кварца Памирских месторождений при высоких температурах. По мере возрастания температуры и давления сначала кристаллизуется более плотная разновидность кремнезема — коэсит, а затем при давлении 100 000 атмосфер и температуре около 2000°C получается новая фаза в виде очень мелких пластинчатых и игольчатых кристаллов. Вскоре американский минералог Э.Чао обнаружил такую модификацию кремнезема и в природе — в Аризонском метеоритном кратере — и назвал ее стишовитом [4]. Минерал кристаллизуется по типу рутила с параметрами элементарной тетрагональной

ячейки $a=4.177$, $c=2.666 \text{ \AA}$ и симметрией $P4_2/mnm$. В его структуре октаэдры с атомами кремния, соединяясь по ребрам, образуют колонки. Четыре колонки объединяются с помощью пятой через вершины ее октаэдров.

Чтобы оценить значение этого открытия, нужно вспомнить, что многие геофизики вообще сомневались в существовании кремнезема с шестерной координацией атомов кремния. Стишовит стал первым примером столь радикальной перестройки кристаллической структуры основного породообразующего минерала Земли. Таким образом было доказано, что на определенных глубинах под влиянием высоких температур и давлений происходит изменение физического состояния минералов.

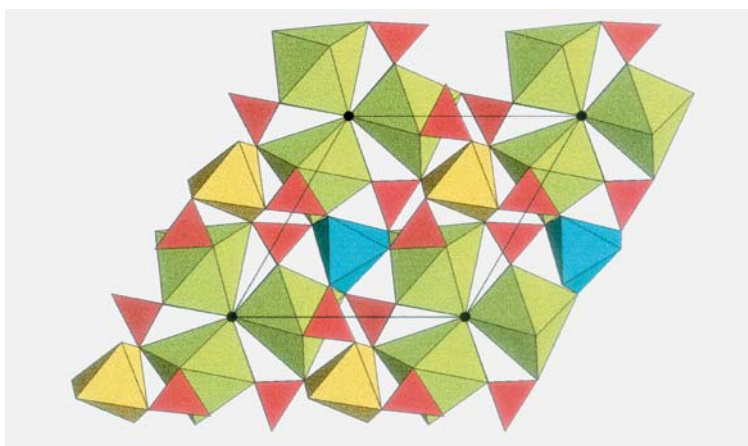
Беловит и делонеит — родственники апатита

В настоящее время насчитывается свыше 4000 минеральных видов, и с каждым годом это число увеличивается на несколько десятков. Откуда же берутся новые минералы сегодня? Разве не исчерпаны природные кладовые еще полвека назад? И да и нет. Дело в том, что про-

цесс открытия минералов на современном этапе решающим образом зависит от детального исследования их атомного строения. И может оказаться, к примеру, что при схожести внешнего вида (а иногда и химического состава) минералы будут различаться внутренним строением, и тогда их отнесут к одной группе, но назовут разными именами.

Беловит и делонеит не исключение. Оба относятся к группе апатита $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$, важного породообразующего минерала, участвующего в формировании земной коры. Кроме того, апатит — биогенный минерал. Он входит в состав костей и зубов человека и животных. Но под этим названием объединяются около 20 минералов. Чем же они различаются? Прежде всего, составом. В качестве примесей к кальцию (а иногда и вместо него) в структуру апатита входят Na, Sr, Pb, Fe, REE. Фосфор замещается на V, As, C, а фтор на Cl или OH. Если какие-либо заместители начинают преобладать над другими элементами, они становятся видообразующими, а минерал обзаводится собственным именем.

Впервые прозрачные зеленоватые кристаллы беловита до 5 мм длиной найдены в 1950 г.



Апатитоподобная структура беловита и делонеита. Нанизанные на тройные оси октаэдры с атомами Na, Ce, Ca, Sr и расположенные вокруг осей Sr-семивершинники объединены тетраэдрами $[\text{PO}_4]$ в трехмерную постройку.

Л.С.Бородиным [5] в породах горы Малый Пункаруайв Ловозерского массива на Кольском п-ове. Минерал назван в честь выдающегося кристаллохимика Николая Васильевича Белова (1891—1982), который до последних своих дней работал в ИКРАНе. Он создал школу советских кристаллохимиков-структурщиков, исследовавших сложнейшие минералы класса силикатов. Еще в довоенные годы Белов занимался тонкой структурой апатита и разработал промышленный метод извлечения из него редкоземельных элементов. Вероятно, поэтому минералу, связанному с апатитом, присвоили его имя.

Делонеит—Се обнаружен А.П.Хомяковым [6] в районе горы Коашва Хибинского щелочного массива в виде ярко-желтых прозрачных кристаллов с сильным стекляннным блеском. Он назван в честь выдающегося российского математика-геометра Б.Н.Делоне (1890—1980) и утвержден в 1995 г. Борис Николаевич официально не был сотрудником нашего института, но его деятельность тесно связана с ИКРАНОм, он был членом ученого совета. Его метод поиска элементарной ячейки кристаллов используется во всех дифрактометрах мира и внесен в Интернациональные таблицы по рентгеновской кристаллографии. Белов и Делоне жили и работали в одно время, и минералы, названные их именами, находятся в тесной ассоциации, а иногда и в эпитактическом сростании друг с другом.

Параметры гексагональных ячеек в беловите $\text{NaSr}_3\text{Ce}(\text{PO}_4)_3\text{F}$ и делонеите $\text{NaCa}_2\text{SrCe}(\text{PO}_4)_3\text{F}$ близки ($a=9.692$, $c=7.201 \text{ \AA}$ и $a=9.51$, $c=7.01 \text{ \AA}$ соответственно), а набор видообразующих элементов, состоящий из Na, Sr и Ce, одинаков (за исключением Ca, который в беловите полностью вытеснен стронцием). Однако соотношение и распределение этих элементов [7, 8] в структуре (тут уж без рентгеноструктурного анализа не

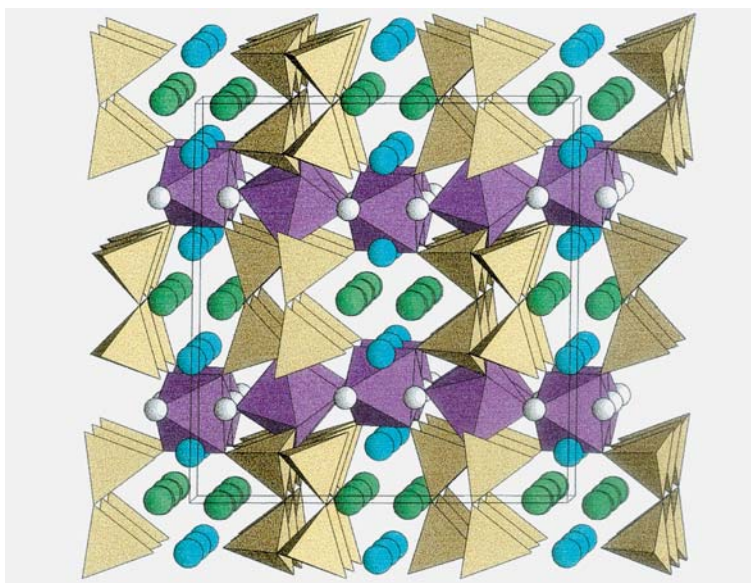
обойтись), а значит симметрия и другие свойства кристаллов различны. Более того, последующие исследования показали, что беловит не один минерал, а представляет собой совокупность минералов, различающихся составом редких земель. В образцах из Ловозера преобладает церий, а из Хибинского массива (на горах Кукисвумчорр и Эвеслогчорр) — лантан. Беловит-La описан И.В.Пековым [9] как новый редкоземельный минерал из группы апатита и утвержден в сентябре 1995 г. уже после смерти академика Белова.

Леммлейнит — минерал группы лабунцовита

Изучение обширной коллекции лабунцовитов из 12 щелочных массивов мира показало, что их весьма сложный и непостоянный состав приводит к значительным изменениям в кристаллической структуре. Это позволяет говорить о существовании в природе целого ряда самостоятельных минеральных видов, родственных лабунцовиту. Среди них и леммлейнит $\text{Na}_2\text{K}_2\text{K}_2(\text{Ti,Nb})_4[\text{Si}_4\text{O}_{12}]_2(\text{O,OH})_4\cdot 4\text{H}_2\text{O}$,

обнаруженный Хомяковым [10] в районе горы Коашва Хибинского щелочного массива. Он назван в честь Г.Г.Леммлейна (1901—1962), известного российского минералога и кристаллографа, который долгие годы работал в Институте кристаллографии и внес большой вклад в разработку учения о связи морфологии кристаллов с условиями образования.

Кристаллы леммлейнита удлиненные, размером до 1 мм, бесцветные и прозрачные с сильным стекляннным блеском. Параметры моноклинной ячейки: $a=14.39$, $b=13.900$, $c=7.825 \text{ \AA}$, $\beta=117.6^\circ$, симметрия $C2/m$, плотность 2.80 г/см³. Родственность минералов группы лабунцовита обусловлена наличием единого каркаса, собранного из колонок вершинносвязанных октаэдров Ti (или Nb), скрепленных между собой четверными кремнекислородными кольцами $[\text{SiO}_4]$. Отличаются же они заполнением объемных каналов структуры. Из-за того, что колонки S-образно изогнуты, в месте их сближения может разместиться еще один октаэдр, который обычно заполняется атомами Fe или Mn. Для леммлейнита характерно высокое содержание щелочных



Структура леммлейнита. Шары голубого цвета — атомы Na, зеленого — K, белого — молекулы воды.

катионов с преобладанием К над Na и полное отсутствие Fe и Mn. Поэтому вместо дополнительного октаэдра в его структуре [11] располагаются атомы К.

Позже Чуканов и Пеков нашли на горе Карнасурт в Ловозерском массиве минерал с иным составом:

$\text{Na}_2\text{K}_2\text{Ba}_{1+x}\text{Ti}_4(\text{Si}_4\text{O}_{12})_2(\text{O},\text{OH})_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$, который является новым высокобариевым членом группы лабунцовита [12]. Он образует прозрачные ярко-оранжевые, оранжево-красные и кофейные кристаллы призматического габитуса до 20 мм в длину. Параметры моноклинной ячейки: $a=14.219$, $b=13.755$, $c=7.767$ Å, $\beta=116.7^\circ$, симметрия $C2/m$, плотность 3.03 г/см³. В нем реализуется предельно возможное для структурного типа лабунцовита катионное упорядочение: атомы Na, K и Ba практически полностью разделяются, занимая в структуре независимые кристаллохимические позиции A, B и C соответственно [13]. Минерал утвержден в сентябре 2000 г. под названием леммлейнит-Ва, при этом имя предыдущего минерала, утвержденное в мае 1997 г., в соответствии с принятыми принципами номенклатуры группы лабунцовита, изменено на леммлейнит-К.

Появление леммлейнита-Ва в Ловозерском массиве наряду с находками в Хибинском массиве вызывает особенный интерес ученых, поскольку породы Ловозера почти вдвое беднее барием, а количество бариевых минералов в Хибинах гораздо больше, чем в Ловозерском массиве. Таким образом, мы имеем яркую иллюстрацию того, как цеолитоподобная структура лабунцовита становится ловушкой для крупного катиона Ва, а минералы с одним и тем же названием, но с разными доминирующими элементами в какой-либо позиции, являются самостоятельными минеральными видами. Вот почему в группе лабунцовита имеется не один леммлейнит, а два.

Икранит и расцветаевит — родственники эвдиалита

Термин «эвдиалит» введен почти два века назад, когда в 1819 г. Штроемейером был описан новый минеральный вид из образцов щелочного массива Илимаусак (Гренландия). С тех пор интерес к эвдиалиту не ослабевает, поскольку он образует гигантские месторождения, богатые Zr, Ti и рядом других довольно редких, необходимых для техники элементов. В последние годы название «эвдиалит» трансформировано в таксон более высокого ранга, объединяющий быстро пополняемую новыми видами группу минералов. Эвдиалит и его аналоги отличаются уникальным многообразием структур и химического состава. Лишь 30 лет назад под руководством Белова его сложнейшая структура была впервые изучена, и до сегодняшнего дня большая часть исследований минералов этой группы приходится на долю Института кристаллографии.

Идеализированная формула эвдиалита выглядит на первый взгляд просто:

$\text{Na}_{15}\text{Ca}_6\text{Zr}_3[\text{Si}_3\text{O}_9]_2[\text{Si}_9\text{O}_{27}]_2\text{Fe}_3\text{Cl}_2\cdot n\text{H}_2\text{O}$. Но простота обманчива. Без преувеличения можно сказать, что в эвдиалите содержится треть таблицы Менделеева. Он обладает и уникальным строением: тригональная структура с симметрией $R3m$, $R-3m$ или $R3$ содержит три типа колец, из которых два — девятичленное из тетраэдров кремния и шестичленное из октаэдров кальция — столь необычны, что больше не встречены ни в одном минерале.

В полостях каркаса, построенного из атомов кремния, циркония и кальция, локализируются разнообразные по размеру катионы с валентностью от 1 до 6, а также крупные анионы, анионные группировки и молекулы воды. Причем примеси в пустотах цеолитоподобного минера-

ла самоорганизуются и занимают оптимальные положения в каждом образце. Этому способствуют и удивительные особенности структуры, в которой имеются две настоящие ловушки для катионов — треугольная и четырехугольная. Первая находится в центре девятичного кольца $[\text{Si}_9\text{O}_{27}]$, имеющего необычную форму: его середина не круглая, а треугольная. Здесь оседают дополнительные Si-тетраэдры, а также октаэдры, чаще всего занятые Nb. Во вторую ловушку попадают катионы со средним радиусом (Fe, Mn, Na и др.), оказывающиеся либо в центре плоского квадрата, либо рядом с ним. Более крупные катионы, а также анионы и молекулы воды заполняют обширные полости.

Чтобы не заблудиться в лабиринтах структуры эвдиалита, Комиссия по новым минералам взяла тайм-аут на два года и провела инвентаризацию видообразующих позиций, обозначив их буквами и снабдив номерами. Согласно разработанной номенклатуре, общая формула эвдиалитов выглядит хотя и устрашающе, но весьма удобно. Буквенные обозначения соответствуют не только набору элементов, но и определенным структурным позициям, каждая из которых может стать видообразующей:

$[A(1)A(2)A(3)A(4)A(5)]_3[M(1,1)M(1,2)]_3[M(2,1)M(2,2)M(2,3)]_{3-6}[M(3)M(4)]Z_3[\text{Si}_{24}\text{O}_{72}]\cdot n\text{H}_2\text{O}\cdot X_{2-4}$, где $A = \text{Na}, \text{Ca}, \text{K}, \text{Sr}, \text{REE}, \text{Ba}, \text{Mn}, \text{H}_3\text{O}$; $M(1,1), M(1,2) = \text{Ca}, \text{Mn}, \text{REE}, \text{Na}, \text{Sr}, \text{Fe}$; $M(2,1) = \text{Fe}, \text{Na}, \text{Zr}, \text{Ta}$; $M(2,2), M(2,3) = \text{Fe}, \text{Mn}, \text{Zr}, \text{Ti}, \text{Na}, \text{K}, \text{Ba}, \text{H}_3\text{O}$; $M(3), M(4) = \text{Si}, \text{Nb}, \text{Ti}, \text{Nb}, \text{W}, \text{Na}$; $Z = \text{Zr}, \text{Ti}$; $X = \text{H}_2\text{O}, \text{Cl}, \text{F}, \text{OH}, \text{CO}_3, \text{SO}_4, \text{SiO}_4$.

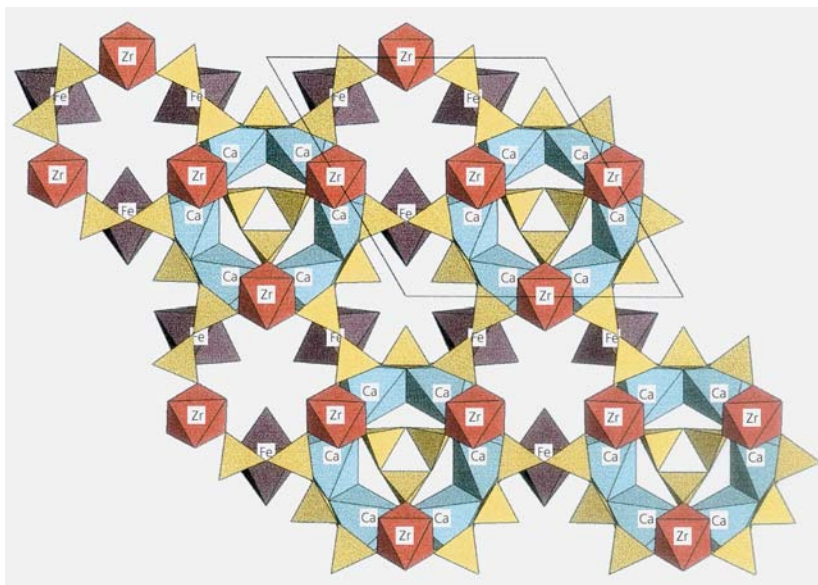
Теоретически легко себе представить, какое количество индивидов можно получить, перебирая состав в каждой из позиций! Проблема, однако, в том, что минералы еще нужно найти. Пока их число чуть больше десятка. Среди них — икранит и расцветаевит, утвержденные в марте текущего года.

Икранит

$(\text{Na}, \text{H}_3\text{O})_{15}(\text{Ca}, \text{Mn}, \text{REE})_6\text{Fe}^{3+}_2\text{Zr}_3$
 $(\square, \text{Zr})(\square, \text{Si})\text{Si}_{24}\text{O}_{66}(\text{O}, \text{OH})_6\text{Cl}n\text{H}_2\text{O}$,
 $(n=2-3)$ найден Чукановым в
 лопаритовом руднике горы Кар-
 насурт. Он образует прозрачные
 желтые и буро-желтые зерна
 табличчатой формы размером
 до $2 \times 1 \text{ см}^2$, по краям кристаллы
 нередко окрашены в буро-
 красный и даже фиолетово-
 красный цвет. Хрупкий, плотность
 2.82 г/см^3 . Параметры его
 тригональной ячейки традицион-
 ны для статистически разупорядоченных образцов эвдиалита:
 $a=14.167$, $c=30.081 \text{ \AA}$, симметрия $R\bar{3}m$.

Главная особенность состава и строения — недозагруженность треугольной ловушки мелкими и средними катионами [14]. Поэтому характерные для других эвдиалитов дисковидные анионные радикалы превращаются в истинные кольца $[\text{Si}_9\text{O}_{27}]$, а сам икранит становится уникальным, чисто кольцевым представителем группы. Вторая особенность связана с четырехугольной ловушкой, в которой находится октаэдр трехвалентного железа — вместо характерного для эвдиалитов двухвалентного в плоской четверной координации.

Как ни старались члены вышеупомянутой комиссии навести порядок в эвдиалитах, минерал преподнес новые сюрпризы. После утверждения номенклатуры стало ясно, что комиссией не учтено возможное удвоение ячейки, а значит, удвоение и числа судьбоносных позиций. Число катионных позиций, которые теперь нужно принимать во внимание, не 13, а 26. И таких мегаэвдиалитов оказалось немало. В Ловозерском и Хибинском щелочных массивах Хомьяков открыл целое семейство минералов с предельно упорядоченными кристаллическими структурами. В том числе расцветаевит, названный в честь автора этой статьи, работающего в Институте без малого 40 лет, за вклад в структурную минералогию, в частности в структурную минералогию эвдиалитов.

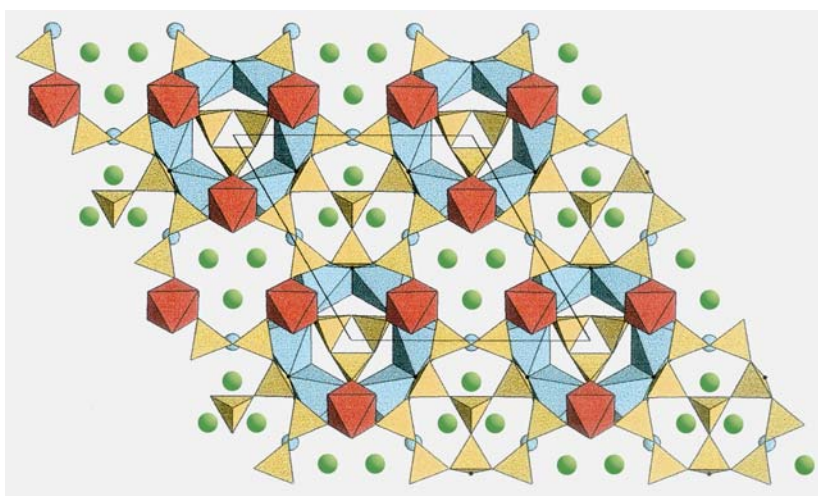


Каркас структуры икранита, составленный из трех типов кольцевых фрагментов: девятенных колец $[\text{Si}_9\text{O}_{27}]$, тройных колец $[\text{Si}_3\text{O}_9]$ и шестерных колец Ca, O-октаэдров. Шестерные кольца объединяются Fe^{3+} -октаэдрами. (Положение атомов Na не показано, чтобы не перегружать рисунок.)

Расцветаевит

$\text{Na}_{27}\text{K}_8\text{Ca}_{12}\text{Fe}_3\text{Zr}_6\text{Si}_{52}\text{O}_{144}(\text{O}, \text{OH}, \text{H}_2\text{O})_6\text{Cl}_2$
 обнаружен на горе Расвумчорр Хибинского массива в интенсивно минерализованных породах ультраагпаитового типа в

виде прозрачных ярко-розовых кристаллов до 2 мм в поперечнике со стекляннным блеском. Особенность его состава — в существенно повышенном содержании калия (6.12 мас.% K_2O против обычных в эвдиалитах



Структура расцветаевита. Каркас составлен из тройных колец $[\text{Si}_3\text{O}_9]$, шестерных колец Ca, O-октаэдров и дисковидных радикалов $[\text{Si}_{10}\text{O}_{28}]$. Шестерные кольца объединяются атомами Na (голубые шары) в квадратной координации (второй модуль с атомами Fe^{2+} вместо Na не показан). Крупные зеленые шары — атомы K.

и пониженном — железа (2.73% FeO против обычных 5—7%). Структура расцветаевита [15] двухэтажная. параметры тригональной ячейки: $a=14.25$, $c=60.97$ Å (~30.5×2). Минерал словно состоит из двух разных эвдиалитов. Такие структуры называют модулярными. На одном этаже (или модуле) в квадратной ловушке находятся атомы Fe, что типично для эвдиалитов, а на другом — Na, присущий минералам группы аллуайвита. Большая часть атомов натрия в А-позициях замещена на более крупные атомы калия, которые в ряде позиций доминируют над натрием. Треугольные ловушки в обоих модулях заняты главным образом кремниевыми тетраэдрами, вследствие чего икранитовые девятёрные кольца [Si₉O₂₇] превратились в дискообразные радикалы [Si₁₀O₂₈].

Открытие расцветаевита, как и других модулярных эвдиалитов, свидетельствует о специфике условий их образования в породах, пересыщенных щелочами и летучими элементами, которые обеспечивают существенное снижение температуры

и расширение временного интервала кристаллизации.

Вместо послесловия

Краткий очерк о минералах, имена которых связаны с историей Института кристаллографии, позволяет задуматься о проблемах, имеющих отношение к открытию новых природных соединений.

Сегодня в нашей стране принято делить науку на ту, которая кормит, и на ту, которую нельзя продать (т.е. «чистые» исследования). К разряду неприбыльных занятий относится и открытие новых видов. Те, кто открывает новые минералы, и те, чьи имена им присваивают, не имеют никакой выгоды, кроме морального удовлетворения. Вместе с тем мир новых минералов — мир новых знаний об окружающей нас природе, что само по себе уже немало. А кто может сказать, какие из этих знаний пригодятся завтра? К примеру, совсем недавно в связи с поиском новых микропористых материалов ученые обратились к цеолитоподобной группе лабунцовита.

Выяснилось, что одни лабунцовиты лучше поглощают из растворов натрия, калий, цезий, а другие — стронций. И объяснение этому кроется в деталях структуры, установленных рентгеноструктурным анализом. Другой пример — группа эвдиалита. Сегодня разрабатываются новые технологические приемы извлечения полезных компонентов из этих соединений без разрушения их структуры, а также рассматриваются возможности использования декатионированных форм для внедрения и удержания в них вредных для здоровья человека элементов. И опять рентгеноструктурный анализ дает необходимую информацию для разработки оптимальных технологий, основанных на кристаллохимическом подходе.

И хочется надеяться, что Институт кристаллографии, несмотря на трудные для науки времена, и впредь будет поддерживать среди приоритетных направлений минералогические исследования, а значит, коллекция минералов, названных именами его сотрудников, будет пополняться. ■

Литература

1. Нефедов Е.И. // Геология. 1955. №4. С.528—530.
2. Стишов С.М. // Химия и жизнь. 1991. №4. С.41—49; №5. С.35—42.
3. Стишов С.М., Попова С.В. // Геохимия. 1961. №10. С.837—839.
4. Сбао Е.С.Т., Fabey J.J., Littler J. et al. // J. Geophys. Res. 1962. V.67. №1. P.419—421.
5. Бородин Л.С., Казакова М.Е. // Докл. АН СССР. 1954. Т.96. №3. С.613—616.
6. Хомяков А.П., Лисицын Д.В., Куликова И.М., Расцветаева Р.К. // Зап. Всероссийского минерал. об-ва. 1996. №5. С.83—94.
7. Клевцова Р.Ф., Борисов С.В. // Журн. структур. химии. 1964. Т.5. №2. С.151—153.
8. Расцветаева Р.К., Хомяков А.П. // ДАН. 1996. Т.349. №3. С.354—357.
9. Пеков И.В., Куликова И.М., Кабалов Ю.К. и др. // Зап. Всероссийского минерал. об-ва. 1996. №3. С.101—109.
10. Хомяков А.П., Нечелюстов Г.Н., Расцветаева Р.К., Дорохова Г.И. // Зап. Всероссийского минерал. об-ва. 1999. №5. С.54—63.
11. Расцветаева Р.К., Аракчеева А.В., Хомяков А.П. // ДАН. 1996. Т.351. №2. С.207—211.
12. Чуканов Н.В., Пеков И.В., Расцветаева Р.К. и др. // Зап. Всероссийского минерал. об-ва. 2001. №3. С.36—43.
13. Расцветаева Р.К., Чуканов Н.В., Пеков И.В. // ДАН. 1997. Т.357. №1. С.64—67.
14. Екименкова И.А., Расцветаева Р.К., Чуканов Н.В. // ДАН. 2000. Т.371. №5. С.625—628.
15. Расцветаева Р.К., Хомяков А.П. // Кристаллография. 2001. Т.46. №4. С.715—721.