
**НОВЫЕ
МИНЕРАЛЫ**

**АВДЕЕВИТ – NA-ДОМИНАНТНЫЙ ЩЕЛОЧНОЙ БЕРИЛЛ: УСТАНОВЛЕНИЕ
СТАТУСА МИНЕРАЛЬНОГО ВИДА И НОВЫЕ ДАННЫЕ**

© 2020 г. А. А. Агаханов^{1, *}, Д. А. Степаненко², Н. В. Зубкова³, Л. А. Паутов¹,
д. чл. И. В. Пеков³, А. В. Касаткин¹, В. Ю. Карпенко¹, В. А. Агаханова⁴, Р. Шкода⁵,
С. Н. Бритвин⁶, д. чл. Д. Ю. Пушаровский³

¹Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН, Ленинский пр., 18, к. 2, Москва, 119071 Россия

²Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, Минск, 220013 Беларусь

³Московский государственный университет, геологический факультет,
Воробьевы горы, Москва, 119991 Россия

⁴Всероссийский научно-исследовательский геологический нефтяной институт,
Шоссе Энтузиастов, Москва, 105118 Россия

⁵Масариков университет, факультет науки, кафедра геологических наук,
Котларшска, 2, Брно, 611 37 Чехия

⁶Санкт-Петербургский государственный университет, кафедра кристаллографии,
Университетская наб., 7/9, Санкт-Петербург, 199034 Россия

*e-mail: atali99@mail.ru

Поступила в редакцию 21.09.2020 г.

После доработки 21.09.2020 г.

Принята к публикации 07.10.2020 г.

В статье описан первый член группы берилла с видообразующим натрием, получивший название авдеевит. Образец, ставший его голотипом, найден в гранитном пегматите на месторождении Кат Чей (другое название – Палельни) близ города Мо-мейк, район Кьяукм, штат Шан, Мьянма. Авдеевит совместно с бериллом образует здесь сноповидные агрегаты размером до 4 см, состоящие из шестиугольных призматических кристаллов размером до 1 см в длину и 1 мм в толщину. Эти кристаллы представляют собой эпитаксические сростания авдеевита (ядро) и берилла (краевая зона). Новый минерал прозрачный, светло-розовый, блеск стеклянный. Твердость по Моосу 8. $D_{изм} = 2.89(2)$, $D_{выч} = 2.875$ г/см³. В проходящем свете авдеевит бесцветный, неплеохроирующий, оптически одноосный (–), $\omega = 1.601(2)$, $\epsilon = 1.594(2)$. Химический состав голотипа (электронно-зондовые данные, Ве, Li, H – ионно-зондовые данные; мас. %): SiO₂ 61.06, Al₂O₃ 17.40, BeO 8.58, Na₂O 1.77, K₂O 0.09, Cs₂O 6.44, Rb₂O 1.38, Li₂O 2.51, H₂O 0.42, сумма 99.63; эмпирическая формула: (Na_{0.34}Cs_{0.27}H₂O_{0.14}Rb_{0.09}K_{0.01})_{Σ0.85}(Be_{2.04}Li_{1.00})_{Σ3.04}Al_{2.03}Si_{6.03}O₁₈. С учетом ранее опубликованных данных для образцов, отвечающих по составу авдеевиту, общая упрощенная формула этого минерала наиболее корректно может быть записана в таком виде: [(Na, R')_{0.5-1}(H₂O)_y]{(Be, Li)₃(Al, M²⁺)₂Si₆O₁₈}, где $y \leq 1$, R' = Cs, Rb, K, Ca, M²⁺ = Fe, Mg, Mn. Кристаллическая структура авдеевита изучена монокристалльным методом, R = 0.0322. Минерал гексагональный, P6/mcc. Параметры элементарной ячейки: a = 9.2287(4), c = 9.2610(3) Å, V = 683.07(5) Å³, Z = 2. Главные линии порошковой рентгенограммы [$d_{изм}$, Å (I, %) (hkl)]: 7.96 (82) (100), 4.60 (31) (002), 3.99 (20) (102, 200), 3.26 (100) (112), 3.02 (37) (202, 210), 2.866 (84) (211), 1.742 (19) (304, 410). Авдеевит принадлежит к структурному типу берилла. От собственно берилла он отличается тем, что сумма крупных катионов R в каналах превышает 0.5 атома на формулу, а среди этих катионов доминирует Na. Авдеевит назван в честь выдающегося русского химика и горного инженера Ивана Васильевича Авдеева (1818–1865), внесшего большой вклад в изучение природных и искусственных соединений бе-

риллия. В статье также приведены сведения об истории изучения обогащенных Na бериллов, в том числе об описанных ранее образцах, отвечающих авдеевиту.

Ключевые слова: авдеевит, новый минерал, щелочной берилл, группа берилла, кристаллическая структура, гранитный пегматит, Кат Чей, Момейк, Мьянма

DOI: 10.31857/S0869605520060027

ВВЕДЕНИЕ

Берилл, несомненно, относится к числу самых знаменитых минералов. Благодаря своим драгоценным разновидностям, в первую очередь изумруду и аквамарину, а также способности давать очень крупные, порой гигантские кристаллы, он известен с античных времен. Берилл – самый распространенный в природе минерал бериллия, минерал, давший название этому химическому элементу.

Идеализированная формула берилла – $\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$, однако более чем двухсотлетняя история исследования этого минерала показала, что его химический состав характеризуется значительными вариациями, и нередко в нем присутствуют в заметных количествах элементы, не входящие в эту формулу.

Кристаллическая структура берилла была впервые расшифрована почти век назад (Bragg, West, 1926) и с тех пор неоднократно изучалась на образцах разного состава. Берилл кристаллизуется в гексагональной сингонии, его пространственная группа $R\bar{6}/mcs$, а оба параметра элементарной ячейки, a и c , близки к 9.2 Å; для приведенной выше формулы $Z = 2$. Структура берилла представляет собой каркасную постройку, которую образуют лежащие в плоскости (0001) шестичленные кремнекислородные кольца $[\text{Si}_6\text{O}_{18}]$, соединенные одиночными Ве-центрированными тетраэдрами и Al-центрированными октаэдрами, расположенными послойно на уровнях, соответственно, $1/4c$ и $3/4c$. В структуре берилла можно выделить тетраэдрический Ве–Si–O мотив, представляющий собой разорванный каркас, и с учетом этого берилл рассматривается рядом исследователей как бериллосиликат алюминия с идеализированной формулой $\text{Al}_2[\text{Be}_3\text{Si}_6\text{O}_{18}]$. В структуре берилла присутствует вытянутый вдоль [0001] канал, геометрической осью которого является кристаллографическая ось 6-го порядка, проходящая через центры колец $[\text{Si}_6\text{O}_{18}]$. Этот канал “гофрированный”: в нем чередуются “пережимы” – в местах расположения кремнекислородных колец (внутренний диаметр кольца и, соответственно, канала составляет 2.5 Å) и “раздувы” – между кольцами, где диаметр канала достигает 5 Å. Сведения о кристаллической структуре берилла собраны и обобщены в работах (Минералы, 1981; Aurisicchio et al., 1988).

Присутствие в каркасной постройке таких достаточно широких каналов придает структуре берилла микропористый характер. Благодаря этой особенности его иногда сравнивают с цеолитами, однако между ними есть принципиальная разница: цеолиты и цеолитоподобные соединения с гетерополиэдрическими (чаще всего октаэдрически-тетраэдрическими) каркасами характеризуются трехмерной системой каналов, что как раз и определяет их важнейшие свойства, в первую очередь способность к ионному обмену (Шукапов, Реков, 2005), тогда как в кристалле берилла система каналов одномерная. В “идеальном” берилле, отвечающем формуле $\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$, эти каналы пусты, в реальных же кристаллах степень и характер их заполнения широко варьируют.

В природе известен берилл с химическим составом, приближающимся к идеальному, однако чаще встречаются образцы этого минерала, содержащие, причем иногда в существенных количествах (до целых массовых процентов), компоненты, отсутствующие в идеализированной формуле. Наиболее типичными и наиболее значимыми в количественном отношении примесями в берилле выступают Li, Na, Cs, Mg, Fe и H_2O , вполне обычны в малых количествах K, Rb, Ca, V, Cr, Mn (Фекличев, 1964; Минералы, 1981). Кристаллохимии берилла, обогащенного примесями компонентами, в первую

очередь щелочными металлами и водой, посвящена обширная литература, и ниже эти вопросы будут затронуты подробнее, здесь же отметим два общих момента, которые особенно важны в ключе нашей статьи. В настоящее время не вызывает сомнения, что: (1) крупные катионы (Na^+ , Cs^+ , K^+ , Rb^+ , Ca^{2+}) и молекулы H_2O находятся в берилле только в каналах; (2) компенсация общего избытка положительного заряда, возникающего при вхождении катионов в каналы, осуществляется за счет замещения катионов металлов в каркасе на более низкозарядные, а именно Be^{2+} на Li^+ , а Al^{3+} на $M^{2+} = \text{Mg}$, Fe , Mn (Белов, Тархова, 1951; Бакакин и др., 1969; Hawthorne, Černý, 1977; Aurisicchio et al., 1988; Artioli et al., 1993; Якубович и др., 2009; и другие работы).

Наиболее крупные катионы, в первую очередь весьма типичный для берилла Cs^+ , могут входить только в позицию в “раздуве” канала (симметрия этой позиции 6_2 , символ Уайкоффа $2a$); здесь же, как правило, находятся молекулы H_2O , а распределение Cs и H_2O статистическое. Более мелкий по сравнению с Cs^+ катион Na^+ располагается в позиции в “пережиме” канала, т.е. в центре кольца $[\text{Si}_6\text{O}_{18}]$ (симметрия позиции $6/m$, символ Уайкоффа $2b$). Расстояние между позициями $2a$ и $2b$ в канале достаточно короткое (немногом более 2 \AA), что исключает совместное заселение катионами соседних позиций в “раздуве” и “пережиме” одного канала. В результате такого расположения позиций на общее количество катионной “начинки” канала накладывается строгое ограничение: максимальное число крупных катионов (сумма Na^+ , Cs^+ , K^+ , Rb^+ , Ca^{2+}) не может превышать 1 атом на вышеприведенную формулу берилла. Надо отметить, что наиболее крупный катион Cs^+ в позиции $2a$ координируется только атомами O каркаса, а координационный полиэдр вокруг катиона Na^+ в позиции $2b$ включает не только шесть атомов O , принадлежащих кольцу $[\text{Si}_6\text{O}_{18}]$, в центре которого эта позиция находится, но и, как правило, две молекулы H_2O , которые могут заселять позицию $2a$ при отсутствии в ней Cs . Промежуточные по размеру между Na^+ и Cs^+ щелочные катионы K^+ и Rb^+ содержатся в берилле в заметно меньших количествах, вероятно, потому, что они недопустимо велики для того, чтобы разместиться в позиции $2b$, но слишком малы для вхождения в очень крупнообъемный полиэдр, центрированный позицией $2a$ (Якубович и др., 2009 и литературные ссылки в этой работе).

Химические анализы образцов берилла, содержащих существенное количество Na и/или Cs , известны давно (см. ниже), и в литературе разных лет можно встретить термины “щелочной берилл” (alkali-beryl), “натровый берилл” (soda-beryl), “цезиевый берилл” (cesian beryl, caesium beryl). С учетом отмеченных выше структурных особенностей, обобщенная кристаллохимическая формула “щелочного берилла” (с преобладанием Al в октаэдрической позиции) может быть записана в таком виде: $[\text{R}_x(\text{H}_2\text{O})_y]\{(\text{Be}, \text{Li})_3(\text{Al}, \text{M})_2\text{Si}_6\text{O}_{18}\}$, где в фигурные скобки взят состав каркаса, в квадратных – состав “начинки” канала, $x \leq 1$, $y \leq 1$, главные R -катионы – Na^+ и/или Cs^+ , а главные M -катионы – Fe^{2+} и/или Mg^{2+} . Подавляющее большинство природных образцов отвечает этой формуле, причем опубликован целый ряд анализов (которые нет оснований считать недостоверными), где количество щелочных катионов R превышает 0.5 атома на формулу (ниже – а.ф.). Согласно современным правилам минералогической номенклатуры, образцы с такими составами следует рассматривать уже не в рамках понятия “разновидность минерального вида берилла”, а как родственные бериллу самостоятельные минеральные виды, где преобладающий R -катион играет роль видообразующего.

Недавно по нашей заявке Комиссия по новым минералам, номенклатуре и классификации Международной минералогической ассоциации (КНМНК ММА) утвердила в качестве самостоятельного минерального вида под названием **авдеевит** (avdeevite, IMA No. 2018–109) такой минерал, где видообразующим R -катионом выступает натрий.

Авдеевит назван в честь выдающегося русского химика и горного инженера Ивана Васильевича Авдеева (1818–1865), внесшего большой вклад в изучение природных и искусственных соединений бериллия. Он выполнил очень точные анализы хризоберилла, фенакита, берилла и исследовал синтетические соли BeSO_4 , $\text{BeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, BeCl_2 , $\text{BeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $\text{K}_2\text{Be}(\text{SO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, K_2BeF_4 . На основании своих аналитических данных И.В. Авдеев впервые четко показал, что окись бериллия имеет формулу BeO , а не Be_2O_3 (Авдеев, 1842), то есть что бериллий двухвалентен, а не трехвалентен, как в те годы считалось. Результаты этих работ И.В. Авдеева позже помогли Д.И. Менделееву окончательно убедить сообщество химиков в двухвалентности бериллия, помещенного им во вторую группу Периодической системы элементов.

Представляется необходимым дать кристаллохимическое определение авдеевита, фиксирующее его положение в номенклатуре группы берилла (Della Ventura et al., 2000). Авдеевит – минеральный вид, обладающий теми же пространственной группой $P6/mcc$ и метрикой элементарной ячейки, что и собственно берилл, и имеющий те же видообразующие компоненты в каркасе (Si, Be и Al), но отличающийся от берилла тем, что сумма крупных катионов R в каналах превышает 0.5 а.ф., а среди этих катионов доминирует Na, который, соответственно, и является в авдеевите одним из видообразующих элементов. Пограничное значение $R_{0.5}$, формально разделяющее берилл, у которого $\Sigma R < 0.5$ а.ф., то есть катионные позиции в канале преимущественно вакантны, и авдеевит с $\Sigma R > 0.5$ а.ф. при преобладании Na среди R -катионов, принято с учетом того, что сумма крупных катионов в позициях $2a$ и $2b$ в канале не может превышать 1 а.ф. При этом: (1) все R -катионы рассматриваются суммарно, без учета того, какую именно позицию в канале занимает каждый из них; (2) количество воды не считается видоопределяющим признаком. Этот подход аналогичен тому, что принят в настоящее время КНМНК ММА для группы цеолитов (Coombs et al., 1998) и для группы вуориярвита в надгруппе лабунцовита, содержащей цеолитоподобные титано- и ниобосиликаты (Chukanov et al., 2002). В целом, авдеевит можно охарактеризовать такой кристаллохимической формулой: $[(\text{Na}, R')_{0.5-1}(\text{H}_2\text{O})_y] \{(\text{Be}, \text{Li})_3(\text{Al}, M^{2+})_2\text{Si}_6\text{O}_{18}\}$, где $y \leq 1$, $R' = \text{Cs}, \text{Rb}, \text{K}, \text{Ca}$, а $M^{2+} = \text{Fe}, \text{Mg}, \text{Mn}$.

Голотипом авдеевита, на результатах изучения которого базировалась наша заявка, одобренная КНМНК ММА, стал образец из месторождения Кат Чей в Мьянме. Он передан в Минералогический музей имени А.Е. Ферсмана РАН (Москва), где теперь хранится в систематической коллекции под номером 86533. В то же время в литературе охарактеризованы (и в некоторых работах достаточно детально) как берилл или его разновидности образцы из других мест, по химическим/кристаллохимическим характеристикам отвечающие приведенному выше определению авдеевита. По этой причине авдеевит можно образно назвать “старым новым минералом”, и в настоящей работе, направленной в первую очередь на установление его статуса как самостоятельного минерального вида, мы, прежде чем перейти к описанию голотипа, дадим краткий исторический обзор, посвященный обогащенным натрием бериллам¹.

КРАТКИЙ ИСТОРИЧЕСКИЙ ОЧЕРК

Сведения о том, что в берилле могут содержаться щелочи и вода, появились в середине XIX века. Вероятно, первое указание на присутствие в составе берилла натрия и воды принадлежит М.Б. Леви, исследовавшему изумруд, собранный им в 1850 г. на рудниках Музо в Новой Гранаде (Колумбия). Анализировался (две навески) тщательно отобранный чистый материал, который был раздроблен в стальной ступке, отсеян на шелковом сите, очищен азотной кислотой, отмыт дистиллированной водой и просушен

¹ Термин “берилл” употребляется здесь и ниже во множественном числе в тех случаях, когда мы подразумеваем два или более минеральных вида (в сегодняшнем понимании) из группы берилла.

при 120 °С. Анализ показал присутствие в одной навеске 0.7, а во второй 0.6 мас. % Na₂O. Также М.Б. Леви нашел в составе изумруда воду в количестве 1.85 мас. % (среднее по 7 анализам при разбросе от 1.65 до 2.07% H₂O) (Levy, 1858). Отметим, что позднее практически такое же количество воды (1.84%) в изумруде из Музо определили Ф. Замбонини и В. Кальоти (Zambonini, Caglioti, 1928).

В 1884 г. С.Л. Пенфильд по результатам своих анализов сделал вывод, что берилл обязательно содержит щелочи, хотя иногда лишь в небольших количествах. По его данным, натрий и литий присутствуют в этом минерале всегда, цезий иногда, а калий и рубидий так и не были обнаружены. В семи проанализированных С.Л. Пенфильдом образцах берилла содержание натрия варьировало от следов до 1.82 мас. % Na₂O. Этот исследователь высказал мнение, что щелочные металлы замещают бериллий (Penfield, 1884). Позднее С.Л. Пенфильд и Д.Н. Харпер значительно улучшили метод отделения Al от Be, заново проанализировали берилл и признали, что в опубликованных в 1884 г. анализах количество бериллия было заниженным (Penfield, Harper, 1886).

Судя по доступной литературе, наиболее высокое содержание натрия, известное в бериллах, найдено Ф. Замбонини и В. Кальоти в 1928 г. в розовом ростерите из Сан-Пьеро-ин-Кампо на острове Эльба, Италия: 4.22 мас. % Na₂O (табл. 1, ан. 9) (Zambonini, Caglioti, 1928). Расчет формулы (здесь и ниже формулы рассчитаны на 18 атомов O, без учета кислорода, относящегося к H₂O) этого ростерита показывает, что сумма щелочных металлов (без лития) в нем близка к 1 а.ф., и мы можем предположить, что позиция Be в нем, вероятно, практически полностью заселена бериллием.

Видимо, самая детальная и разносторонняя минералогическая характеристика “натрового берилла” опубликована Т.А. Соседко (1957). В этой статье не приводится сведений о местонахождении изученного материала, согласно действовавшим в те годы правилам засекречивания географической информации для редкометальных месторождений, однако не вызывает сомнения, что это Вороньи тундры на Кольском полуострове. В жилах редкометальных гранитных пегматитов здесь выделяются приконтактная, промежуточная и центральная зоны, и для каждой из них характерен берилл со своими физическими свойствами и химическим составом. Наиболее богатый натрием (2.50 мас. % Na₂O) минерал встречен в виде прозрачных светло-розовых зерен без кристаллографической огранки в центральной зоне пегматита вместе с микроклином, кварцем, розовым сподуменом, альбитом-клевеландитом, полихромным турмалином, лепидолитом, амблигонитом и поллуцитом. Расчет данных химического анализа, выполненного в Институте химии силикатов АН СССР Е.Н. Егоровой-Фурсенко (табл. 1, ан. 2), приводит к такой формуле: $[(Na_{0.47}Cs_{0.17}Ca_{0.05})_{\Sigma 0.69}(H_2O)_{0.73}]\{(Al_{1.96}Mg_{0.03}Fe^{3+}_{0.01})_{\Sigma 2.00}(Be_{2.47}Li_{0.24})_{2.71}Si_{6.03}O_{18}\}$. Для изученных бериллов приведены порошковые рентгенограммы и параметры элементарных ячеек (в т.ч. показан рост параметра *c* с увеличением содержания щелочей в берилле), определены плотность и оптические характеристики (Соседко, 1957). Отметим, что характер изоморфизма в “щелочных бериллах” позднее рассматривался целым рядом исследователей в т.ч. с опорой на эти данные (Франк-Каменецкий, 1964; Фекличев, 1964; Бакакин и др., 1970; Соседко, Франк-Каменецкий, 1972).

В 1969 г. были опубликованы результаты изучения “натрового берилла” из пегматитового месторождения Магаритра на Мадагаскаре (образец № 21078 из коллекции Минералогического музея имени А.Е. Ферсмана АН СССР; химический анализ выполнен И.К. Кузнецовой, Институт геологии и геофизики СО АН СССР). В нем обнаружено 1.86 мас. % Na₂O (табл. 1, ан. 3). На этом образце, видимо, впервые изучена кристаллическая структура (*R* = 11.2%) (Бакакин и др., 1969) минерала, который сейчас получил название авдеевит.

Годом позже вышла еще одна работа тех же авторов, посвященная “щелочным бериллам”. В ней, в частности, приведен неполный анализ образца с более высокими содержаниями щелочей (мас. %): Na₂O 3.00, Cs₂O 4.44, K₂O 0.18, Rb₂O 0.10. На материале 26 образцов подробно рассмотрены закономерности изменения параметров эле-

Таблица 1. Химический состав авдеевита (мас. %)
Table 1. Chemical composition of avdeevite (wt %)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SiO ₂	61.06 (59.60–62.23)	61.88	61.28	61.80	63.50	61.14	61.70	61.07	60.42	62.23	62.00
Al ₂ O ₃	17.4 (16.94–17.79)	17.1	17.15	16.42	17.03	17.13	17.26	17.2	15.65	15.41	17.71
TiO ₂		0.01				0.25	0.07				
Fe ₂ O ₃		0.08	0.12						0.77	0.04	0.018
Cr ₂ O ₃										0.33	
FeO				0.31	0.07		0.06	0.10		0.07	
MnO			0.03						0.74	0.02	0.004
CaO		0.44	0.10	0.02	0.02	0.35	0.39	0.42	0.39	0.31	0.030
MgO		0.22		0.04	0.01		0.06		0.14	0.76	0.017
SrO									0.02		
BaO									0.19		
BeO	8.58 (8.39–8.84)	10.54	10.47	9.66	10.33	9.75	9.72	9.79	13.21	11.90	11.32
Li ₂ O	2.51 (1.98–2.81)	0.60	1.33	1.91	1.73	1.78	1.85	1.75	0.43		1.13
Na ₂ O	1.77 (1.67–1.86)	2.50	1.86	2.18	2.42	1.99	2.00	2.00	4.22	2.63	1.68
K ₂ O	0.07 (0.03–0.15)		0.65	0.01	0.01				2.25	2.89	0.269
Rb ₂ O	1.38 (0.77–2.04)		0.17								0.109
Cs ₂ O	6.44 (6.12–6.80)	4.13	4.09	8.03	5.13	5.45	5.11	5.51	0.91		3.27
H ₂ O	0.42 (0.31–0.58)								0.84	2.59	2.06
H ₂ O- п.п.п.		0.16								0.06	0.07
Сумма	99.63	99.92	99.97	100.38	100.25	97.84	98.22	97.84	100.18	99.24	99.68
Формульные коэффициенты (O=18)											
Si	6.04	6.03	5.99	6.05	6.05	6.00	6.01	6.00	5.75	6.00	5.96
Al	2.03	1.96	1.98	1.89	1.91	1.98	1.98	1.99	1.76	1.75	2.01
Ti		0.00				0.02	0.01				
Fe ⁺³		0.01	0.01						0.06	0.00	0.00
Cr										0.03	
Fe ⁺²				0.03	0.01		0.00	0.01		0.01	
Mn									0.06	0.00	
Mg		0.03		0.01	0.00		0.01		0.02	0.11	0.01
Сумма	2.03	2.00	1.99	1.93	1.92	2.00	2.00	2.00	1.90	1.90	2.02
Be	2.04	2.47	2.46	2.27	2.36	2.30	2.28	2.31	3.02	2.76	2.61
Li	1.00	0.24	0.52	0.75	0.66	0.70	0.73	0.69	0.16		0.39
Сумма	3.04	2.71	2.98	3.02	3.02	3.00	3.01	3.00	3.18	2.76	3.00
Ca		0.05	0.01	0.00	0.00	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.00
Sr									0.00		
Ba									0.01		
Na	0.34	0.47	0.35	0.41	0.45	0.38	0.38	0.38	0.78	0.49	0.31
K	0.01			0.00	0.00				0.27	0.36	0.04
Rb	0.09		0.01								0.01
Cs	0.27	0.17	0.17	0.34	0.21	0.23	0.21	0.23	0.04		0.13
Сумма	0.71	0.64	0.54	0.75	0.66	0.61	0.59	0.61	1.09	0.85	0.54*
H ₂ O	0.14	0.73							0.28	0.84	0.66

Примечание. 1 – Кат Чей, Мьянма (голотип; наши данные); 2 – Вороны тундры, Кольский п-ов (Соседко, 1957); 3 – Магаритра, Мадагаскар (Бакакин и др., 1969); 4, 5 – Кектогай, Китай (Wang et al., 2009); 6–8 – Эльба, Италия (Auricchio et al., 2012); 9 – Эльба, Италия (Zambonini, Caglioti, 1928); 10 – Замбия (Bank, 1974); 11 – Танко, Манитоба, Канада (Cerný, Simpson, 1977); * – в сумму катионов в каналах авторами процитированной работы включено 0.05 а.ф. Li; этот образец рассматривается нами как пограничный по составу между бериллом и авдеевитом.

ментарной ячейки, порошковых рентгенограмм и ИК-спектров бериллов в зависимости от изоморфных замещений (Бакакин и др., 1970).

Весьма детально изучен “щелочной берилл” из хорошо известного редкометалльного (Ta, Cs, Li, Be) пегматитового месторождения Танко (Берник Лейк, ЮВ Манитоба, Канада). В частности, в нем установлено 1.68 мас. % Na₂O: табл. 1, ан. 11 (Černý, Simpson, 1977), а результаты определения кристаллической структуры ($R = 5.5\%$) показали, что вхождение щелочных катионов в канал здесь компенсируется в зарядовом отношении замещением части Be на Li в каркасе (Hawthorne, Černý, 1977).

За последние четыре десятилетия в разных регионах мира описан целый ряд находок “натрового берилла”, и среди них есть такие, которые отвечают определению авдеевита. В табл. 1 приведен состав этого минерала из гранитных пегматитов Замбии (ан. 10: Bank, 1974), Китая (ан. 4–5: Wang et al., 2009) и Италии (ан. 6–8: Aurisicchio et al., 2012).

ГОЛОТИП АВДЕЕВИТА: УСЛОВИЯ НАХОЖДЕНИЯ И ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Изученный нами образец, ставший голотипом авдеевита, найден на месторождении цветного турмалина Кат Чей (Kat Chay), также известном как Палельни (Palelni), которое расположено недалеко от деревни Хетчел (Khetchel) близ города Момейк (Momeik) в районе Кьяукм (Kyaukme), штат Шан (Shan), Мьянма (бывш. Бирма). Это месторождение относится к полю гранитных пегматитов, приуроченному к Центральному поясу вольфрамо- и оловоносных гранитоидов – полосе длиной 1500 км и шириной 50 км, вытянутой в меридиональном направлении от штата Качин на севере до Могоу на юге (Paik, 2017). Гранитные интрузивы здесь имеют позднемеловой–раннеэоценовый возраст. Пегматитовые тела представляют собой дайки и жилы, секущие гранитоиды, мигматиты, гранитогнейсы, гнейсы и сланцы. Мощность пегматитовых тел обычно составляет 2–5 м, а длина – 30–150 м; иногда они достигают в длину 300 м. Гранитные пегматиты сложены кварцем, ортоклазом, микроклином, альбитом, мусковитом, биотитом и содержат турмалин, берилл, гранат, топаз, лепидолит, магнетит, вольфрамит, касситерит, колумбит (Zaw, 1998).

Авдеевит находится в виде ориентированных сростков с бериллом. Эти минералы образуют совместные сноповидные агрегаты (до 4 см), состоящие из шестиугольных призматических кристаллов размером до 1 см в длину и 1 мм в толщину (рис. 1). Центральная часть каждого кристалла сложена авдеевитом, на который эпитаксически нарастает берилл; граница между ними резкая (рис. 2).

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Авдеевит прозрачный, имеет светло-розовый цвет и стеклянный блеск. В ультрафиолетовых лучах он не люминесцирует. Минерал хрупкий, отмечается несовершенная спайность по {001}, излом неровный. Твердость по шкале Мооса равна 8. Твердость микровдавливания, измеренная с помощью микротвердометра ПМТ-3 при нагрузке 150 г (градуировка по NaCl), составляет 1300 кгс/мм² (среднее значение по 20 измерениям при разбросе единичных замеров от 1200 до 1400 кгс/мм²). Плотность авдеевита, измеренная путем уравнивания зерен в растворе Клеричи, составляет 2.89(2) г/см³, вычисленная плотность – 2.875 г/см³ (для эмпирической формулы и параметров элементарной ячейки, определенных на монокристалле).

Авдеевит оптически одноосный, отрицательный. Показатели преломления, измеренные иммерсионным методом, таковы: $n_o = 1.601(2)$, $n_e = 1.594(2)$ (для света с длиной волны 589 нм).

Спектр комбинационного рассеяния света (КРС) авдеевита получен с помощью спектрометра Horiba Labram HR Evolution, оснащенного оптическим микроскопом Olympus BX 41, голографической решеткой (600 штрих/мм) и кремниевым CCD-детек-



Рис. 1. Сноповидный агрегат розовых кристаллов, представляющих собой эпитактические сростки авдеевита и берилла. Голотипный образец из Кат Чей, Мьянма. Размер образца 3.8 см.

Fig. 1. Sheaf-like aggregate of pink crystals composed of epitaxially intergrown avdeevite and beryl. The holotype specimen, Kat Chay, Myanmar. Sample size is 3.8 cm.

тором, охлаждаемым с помощью элемента Пельтье. Источником монохроматического излучения послужил полупроводниковый лазер с рабочей длиной волны 633 нм и мощностью на выходе 10 мВт. Эффективный диаметр лазерного пучка вблизи поверхности образца составил около 2.6 мкм. КР-спектр регистрировался в 180-градусной геометрии рассеяния в диапазоне $100\text{--}4000\text{ см}^{-1}$ со спектральным разрешением $\sim 2\text{ см}^{-1}$.

В КР-спектре авдеевита (рис. 3) полосы в диапазоне $3750\text{--}3500\text{ см}^{-1}$ соответствуют валентным колебаниям O–H молекул H_2O . Отсутствие полос в интервале $1600\text{--}1500\text{ см}^{-1}$, которые могли бы быть порождены деформационными колебаниями O–H связей молекул H_2O , вероятно, объясняется малым количеством воды в минерале и низким коэффициентом экстинкции. Полосы в диапазоне $1250\text{--}950\text{ см}^{-1}$ соответствуют валентным колебаниям связей Si–O–Si и Si–O. Сильная полоса с максимумом при 687 см^{-1} отнесена к колебаниям Be–O. Полосы с частотами ниже 600 см^{-1} связаны с валентными колебаниями Al–O и Li–O, деформационными колебаниями O–Si–O, Si–O–Si и Be–O и решеточными модами.

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ

Химический состав авдеевита (табл. 1, ан. 1) изучен с помощью электронно-зондового микроанализатора Superprobe 733 фирмы JEOL с вольфрамовым термоэмиссионным катодом, оснащенного пятью волнодисперсионными спектрометрами, и вторичного-ионного масс-спектрометра (ионного зонда) Cameca IMS-4F. Измерение содержаний Si, Al, Na, K, Cs и Rb получены на волнодисперсионных спектрометрах

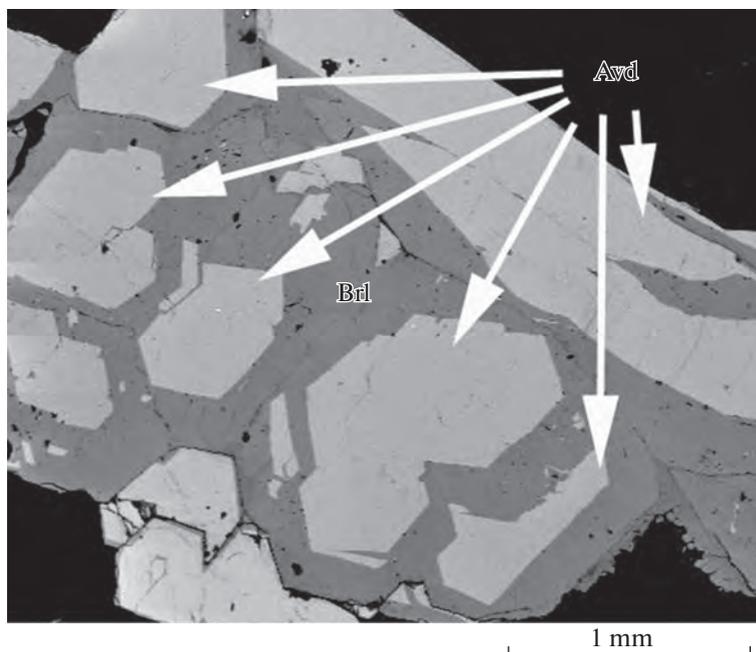


Рис. 2. Эпитаксическое срастание авдеевита (Avd) и берилла (Brl). Полированный срез соответствует грани {0001} обоих минералов. Изображение в отраженных электронах.

Fig. 2. Epitactic overgrowing of avdeevite (Avd) by beryl (Brl). Polished section in the plane coplanar to the {0001} face of crystals of both minerals. BSE image.

электронного микроанализатора, при ускоряющем напряжении 20 кВ и токе зонда 20 нА. В качестве стандартов использовались Microcline 107 (Si, K), Al₂O₃ (Al), Albite 105 (Na), CsNb₄O₁₁ (Cs), RbNb₄O₁₁ (Rb). Расчет концентраций химических элементов проводился по программе ZAF-коррекции. Измерение содержаний Be, Li, и H₂O было проведено С.Г. Симакиным методом вторично-ионной масс-спектрометрии (ионного зонда) в Институте микроэлектроники и информатики РАН. Концентрации каждого элемента вычислялись на основе измеренных интенсивностей положительных атомарных вторичных ионов, нормированных на интенсивность вторичных ионов ³⁰Si⁺ с использованием коэффициентов относительной чувствительности, полученных на стандартных образцах.

Усредненный по 10 точкам анализов состав минерала отвечает эмпирической формуле [Na_{0.34}Cs_{0.27}(H₂O)_{0.14}Rb_{0.09}K_{0.01}]_{Σ0.85}(Be_{2.04}Li_{1.00})_{Σ3.04}Al_{2.03}Si_{6.03}O₁₈. Упрощенная формула голотипа авдеевита может быть записана как (Na,Cs)(Be₂Li)Al₂Si₆O₁₈ · 0.nH₂O.

Индекс сходимости состава и свойств по Гладстону–Дейлу (Mandarino, 1981) составляет для авдеевита $(1 - K_p/K_c) = 0.004$, *superior*.

Также был проанализирован электронно-зондовым методом (определены содержания Si, Al, Na, K, Cs и Rb) берилл, эпитаксиально нарастающий на авдеевит. Данные получены с помощью электронно-зондового микроанализатора Superprobe 733 фирмы JEOL, оснащенного энергодисперсионным спектрометром, при ускоряющем напряжении 20 кВ и токе зонда 2 нА. Содержания Be, Li и H₂O не определялись. Полученный химический состав (усредненные цифры по 7 точкам анализов) – SiO₂ 63.24, Al₂O₃ 18.04, P₂O₅ 0.73, BeO 11.35, Na₂O 1.23, Cs₂O 2.50, Rb₂O 0.87, Li₂O 0.95, сумма 98.91 (мас. %), отвечает эмпирической формуле [Na_{0.22}Cs_{0.10}Rb_{0.05}]_{Σ0.37}(Be_{2.63}Li_{0.37})_{Σ3.00}Al_{2.01}(Si_{5.92}P_{0.06})_{5.98}O₁₈,

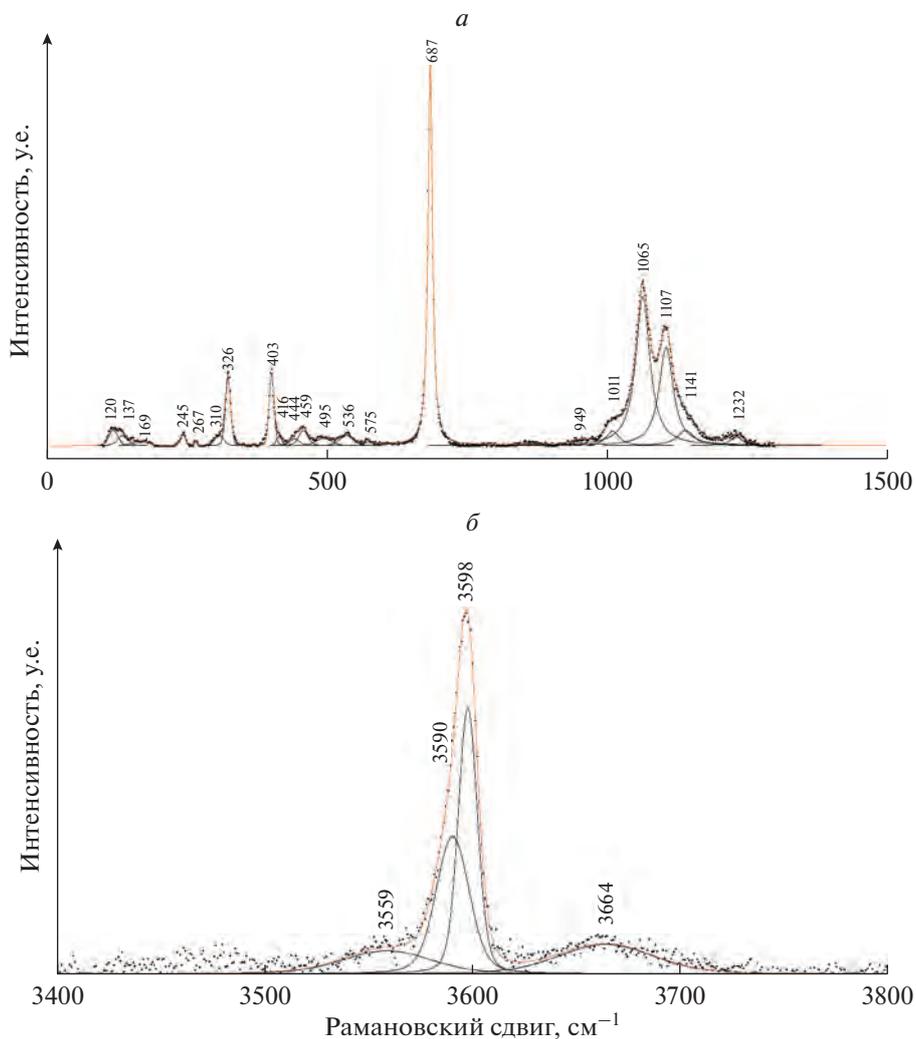


Рис. 3. КР спектр авдеевита. Измеренный спектр показан пунктирами. Оранжевая кривая, аппроксимирующая пунктир – суперпозиция фойтовских пиков (черные), полученных в результате разложения спектра на индивидуальные полосы.

Fig. 3. Raman spectrum of avdeevite. The measured spectrum is shown by dots. The orange curve matching to dots is a result of spectral fit as a sum of individual Voigt peaks (black) shown below the curve.

рассчитанной на 18 атомов О (формула записана без учета возможного содержания H_2O). Содержания Ве и Li рассчитаны, исходя из условия баланса зарядов для суммы (Ве + Li), равной 3 а.ф. Как можно видеть, этот берилл тоже содержит Na, Cs и Rb, но в количествах меньших, чем предшествующий ему по времени кристаллизации авдеевит.

РЕНТГЕНОДИФРАКЦИОННЫЕ ДАННЫЕ И КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА

Рентгенографическое исследование порошка голотипного авдеевита (табл. 2) выполнено на монокристалльном дифрактометре Rigaku RAXIS Rapid II с цилиндриче-

ским IP детектором и рентгеновской трубкой с вращающимся анодом (CoK α -излучение, геометрия Дебая–Шеррера, $d = 127.4$ мм) при ускоряющем напряжении 40 кВ и силе тока 15 мА; время экспозиции 15 мин. Интегрирование исходных данных с цилиндрического детектора проведено с помощью программного пакета osc2tab (Бритвин и др., 2017). Все рефлексы порошковой рентгенограммы хорошо индицируются в гексагональной элементарной ячейке со следующими уточненными по порошковым данным параметрами: $a = 9.219(2)$, $c = 9.224(2)$ Å, $V = 678.9(2)$ Å³.

Монокристалльное рентгеновское исследование голотипного авдеевита выполнено с помощью дифрактометра Xcalibur S CCD (MoK α -излучение) на кристалле с размерами $0.15 \times 0.24 \times 0.27$ мм для полной сферы обратного пространства. Обработка экспериментальных данных производилась с помощью пакета программ CrysAlisPro версии 1.171.37.35 (Agilent, 2014). Параметры гексагональной ячейки изученного монокристалла: $a = 9.2287(4)$, $c = 9.2610(3)$ Å, $V = 683.07(5)$ Å³, пространственная группа $P6/mcc$. Кристаллическая структура определена прямыми методами и уточнена до $R = 0.0322$ для 311 независимых рефлексов с $I \geq 2\sigma(I)$ с использованием комплекса программ SHELX (Sheldrick, 2015). Кристаллографические характеристики, данные монокристалльного эксперимента и параметры уточнения структуры авдеевита приведены в табл. 3, координаты атомов и параметры атомных смещений в табл. 4 и 5, межатомные расстояния в табл. 6.

Авдеевит принадлежит к структурному типу берилла, охарактеризованному выше. Уточнение заселенности позиции (Be, Li) дало для структурно изученного кристалла такое соотношение этих элементов: $\text{Be}_{0.75}\text{Li}_{0.25} = (\text{Be}_{2.25}\text{Li}_{0.75})_{\Sigma 3}$. Это несколько отличается от данных, полученных методом вторично-ионной масс-спектрометрии (табл. 1, ан. 1). Такое расхождение может быть обусловлено как методическими причинами, так и внутрифазовой неоднородностью минерала – вариациями химического состава от кристалла к кристаллу. Распределение внекаркасных катионов по позициям выполнено на основе уточнения электронного содержания позиций (e_{ref}), анализа межатомных расстояний и данных химического состава. Как и в образцах бериллов, изученных ранее (Artioli et al., 1993; Якубович и др., 2009 и литературные ссылки в этих работах), в авдеевите наиболее крупные катионы Cs⁺ и Rb⁺, а также молекулы H₂O занимают позицию $2a$, обозначенную как $A(2)$ в табл. 4–6 и на рис. 4, тогда как Na⁺ входит в позицию $2b$, обозначенную там же как $A(1)$. Соотношение статистически замещающих друг друга катионов Cs, Rb и молекул воды в позиции $A(2)$ определено в результате уточнения электронного содержания позиции (с использованием кривой атомного рассеяния Cs) и на основании данных химического состава (табл. 1, ан. 1). Величина e_{ref} для позиции $A(2)$ составляет 19.91, что позволило предложить следующее распределение катионов в этой позиции: $\text{Cs}_{0.26}\text{Rb}_{0.12}(\text{H}_2\text{O})_{0.12}$, что соответствует электронному содержанию 19.70. Уточнение количества Na в позиции $A(1)$ привело к коэффициенту заселенности 0.37, что хорошо согласуется с данными по химическому составу. Кристаллохимическая формула структурно изученного монокристалла авдеевита такова: $[\text{Na}_{0.37}\text{Cs}_{0.26}\text{Rb}_{0.12}(\text{H}_2\text{O})_{0.12}]\{(\text{Be}_{2.25}\text{Li}_{0.75})\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}\}$.

Позиция $A(2)$ в структуре авдеевита координирована двенадцатью атомами кислорода каркаса, а позиция $A(1)$ центрирует гексагональную бипирамиду, шесть атомов кислорода каркаса которой лежат в экваториальной плоскости, а два апикальных атома кислорода принадлежат молекулам воды в позиции $A(2)$. Дополнительные позиции молекул H₂O с низкой заселенностью, также координирующие Na, могут в незначительных количествах присутствовать в каналах каркаса. Разностный синтез Фурье содержит пик (0.53 e/Å³) с координатами $x = 0.0413$, $y = 0.0825$ и $z = \frac{1}{4}$, который может рассматриваться как атом кислорода молекулы воды, также координирующей позицию $A(1)$. Однако из-за очень малой предполагаемой заселенности и нахождения рядом “тяжелой” позиции $A(2)$ (расстояние между ними 0.66 Å) эта позиция не была включена в окончательную модель структуры.

Таблица 2. Результаты расчета порошковой рентгенограммы авдеевита
Table 2. Powder X-ray diffraction data of avdeevite

$I_{\text{изм}}$	$d_{\text{изм}}$	$I_{\text{выч}}^*$	$d_{\text{выч}}^{**}$	h	k	l	
82	7.96	24	7.992	1	0	0	
31	4.60	20	4.631	0	0	2	
20	3.99	5	4.006	1	0	2	
			0.05	3.996	2	0	0
100	3.26	100	3.269	1	1	2	
37	3.02	31	3.025	2	0	2	
			19	3.021	2	1	0
84	2.866	75	2.871	2	1	1	
13	2.524	6	2.530	2	1	2	
8	2.305	10	2.315	0	0		
			1	2.309	3	0	2
			2	2.307	2	2	0
8	2.214	7	2.224	7	0	3	
			6	2.217	3	1	0
9	2.151	0.5	2.159	2	1	3	
			6	2.156	3	1	1
2	2.060	3	2.065	2	2	2	
8	1.996	3	2.003	2	0	4	
3	1.832	3	1.838	2	1	4	
			1	1.835	4	0	2
8	1.797	0.5	1.834	3	2	0	
			0.5	1.799	3	2	1
19	1.742	16	1.748	3	0	4	
			13	1.744	4	1	0
7	1.711	10	1.714	4	1	1	
13	1.630	18	1.634	2	2	1	
			4	1.632	4	1	2
4	1.597	2	1.598	5	0	0	
6	1.574	3	1.574	3	2	3	
			5	1.574	2	1	5
1	1.538	4	1.543	0	0	6	
			0.5	1.538	3	3	0
10	1.516	15	1.518	4	1	3	
1	1.490	1	1.491	4	2	1	
7	1.458	8	1.463	1	1	6	
			6	1.460	3	3	2
1	1.417	0.5	1.421	3	1	5	
			0.5	1.418	5	1	1
1	1.390	4	1.393	4	1	4	
4	1.370	3	1.374	2	1	6	
			1	1.371	5	1	2
1	1.355	0.5	1.357	4	2	3	
2	1.331	1	1.331	6	0	0	
			0.5	1.331	3	0	6
1	1.313	0.5	1.313	4	3	0	

Table 2. (Contd.)

$I_{\text{изм}}$	$d_{\text{изм}}$	$I_{\text{выч}}^*$	$d_{\text{выч}}^{**}$	h	k	l
2	1.300	1	1.303	3	2	5
		0.5	1.302	4	3	1
		3	1.283	2	2	6
10	1.279	12	1.280	6	0	2
		6	1.280	5	2	0

* Приведены только отражения с вычисленной интенсивностью ≥ 0.5 .
 ** Межплоскостные расстояния вычислены на основе монокристалльных данных.

Таблица 3. Основные кристаллографические характеристики и данные монокристалльного эксперимента для авдеевита

Структурная формула	$[\text{Na}_{0.37}\text{Cs}_{0.26}\text{Rb}_{0.12}(\text{H}_2\text{O})_{0.12}]$ $\{(\text{Be}_{2.25}\text{Li}_{0.75})\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}\}$
Формульная масса	590.55
Температура, К	293(2)
Излучение и длина волны, Å	MoK α ; 0.71073
Сингония, пространственная группа, Z	Гексагональная, P6/mcc, 2
Параметры элементарной ячейки, Å	$a = 9.2287(4)$ $c = 9.2610(3)$
$V, \text{Å}^3$	683.07(5)
Коэффициент поглощения $\mu, \text{мм}^{-1}$	1.962
F_{000}	577
Размеры кристалла (мм)	0.15 × 0.24 × 0.27
Дифрактометр	Xcalibur S CCD
$\theta_{\text{мин}}-\theta_{\text{макс}} (^\circ)$	2.55–28.27
Интервалы сканирования	$-12 \leq h \leq 12, -12 \leq k \leq 12, -12 \leq l \leq 12$
Общее число отражений	10188
Число независимых отражений	312 ($R_{\text{int}} = 0.0541$)
Число независимых отражений $I > 2\sigma(I)$	311
Обработка данных	CrysAlisPro, Agilent Technologies, v. 1.171.37.35 (Agilent Technologies, 2014)
Определение структуры	Прямые методы
Уточнение структуры	МНК по F^2
Число уточняемых параметров	33
$R1, wR2 [I > 2\sigma(I)]$	$R1 = 0.0322, wR2 = 0.0898$
$R1, wR2$ [все рефлексы]	$R1 = 0.0325, wR2 = 0.0900$
GoF	1.208
$\Delta\rho_{\text{мин}}/\Delta\rho_{\text{макс}} (e/\text{Å}^3)$	-0.42/0.54

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Группа берилла как самостоятельное подразделение появилась в минералогической номенклатуре лишь два десятилетия назад (Della Ventura et al., 2000). До этого в ее делении просто не имелось необходимости: у берилла был известен только один близкий структурно-химический “родственник”² – баццит $\text{Be}_3\text{Sc}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$, отличающийся от него нахождением Sc^{3+} на месте Al (Peugonel, 1956). За последнюю четверть века были открыты три новых бериллоподобных минерала – стоппаниит $\text{Be}_3\text{Fe}^{3+}_2\text{Si}_6\text{O}_{18} \cdot \text{H}_2\text{O}$ (Ferraris et al., 1998; Della Ventura et al., 2000), пеззоттаит $\text{Cs}(\text{Be}_2\text{Li})\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$ (Laurs et al., 2003; Hawthorne et al., 2004) и джонкойвулаит $\text{Cs}(\text{Be}_2\text{B})\text{Mg}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$ (Palke et al., 2019),

² Структурно близкий минерал индиалит $\text{Mg}_2\text{Al}_3(\text{AlSi}_5\text{O}_{18})$, гексагональный диморф кордиерита, в группу берилла не включен.

Таблица 4. Координаты атомов, параметры их смещений (U_{eq} , в \AA^2), заселенности позиций (s.o.f.) и симметрия позиций (символ Уайкоффа) в авдеевите
Table 4. Coordinates, equivalent displacement parameters (U_{eq} , in \AA^2) of atoms, site occupancy factors (s.o.f.), and Wyckoff positions in avdeevite

Позиция	x	y	z	U_{eq}	Заселенность позиции (s.o.f.)	Симметрия позиции
Al	2/3	1/3	1/4	0.0093(4)	1	4c
Si	0.39035(11)	0.12085(11)	0.0	0.0092(3)	1	12l
(Be, Li)	1/2	0.0	1/4	0.013(3)	Be _{0.75(18)} Li _{0.25(18)}	6f
O(1)	0.4983(2)	0.1489(3)	0.1442(2)	0.0190(5)	1	24m
O(2)	0.3021(3)	0.2342(3)	0.0	0.0191(6)	1	24m
A(1)	0.0	0.0	0.0	0.036(4)	Na _{0.372(18)}	2b
A(2)	0.0	0.0	1/4	0.0341(5)	Cs _{0.26} Rb _{0.12} Ow _{0.12}	2a

Таблица 5. Анизотропные параметры смещений атомов (\AA^2) (кроме водорода) для авдеевита
Table 5. Anisotropic displacement parameters (in \AA^2) of non-hydrogen atoms in the structure of avdeevite

Позиция	U_{11}	U_{22}	U_{33}	U_{23}	U_{13}	U_{12}
Al	0.0121(5)	0.0121(5)	0.0036(7)	0.000	0.000	0.0061(3)
Si	0.0117(4)	0.0120(5)	0.0041(4)	0.000	0.000	0.0061(4)
(Be, Li)	0.017(3)	0.013(3)	0.008(3)	0.000	0.000	0.0063(18)
O(1)	0.0246(9)	0.0259(10)	0.0117(8)	-0.0088(7)	-0.0096(7)	0.0165(8)
O(2)	0.0207(14)	0.0166(12)	0.0231(13)	0.000	0.000	0.0116(11)
A(1)	0.026(4)	0.026(4)	0.055(9)	0.000	0.000	0.013(2)
A(2)	0.0390(7)	0.0390(7)	0.0244(9)	0.000	0.000	0.0195(4)

Таблица 6. Некоторые межатомные расстояния (\AA) в структуре авдеевита
Table 6. Selected interatomic distances (\AA) in the structure of avdeevite

Al–O(1)	1.9042(19) × 6	A(1)–A(2) when A(2) = Ow	2.3152 × 2
Si–O(1)	1.6078(19) × 2	–O(2)	2.533(3) × 6
–O(2)	1.613(3)		
–O(2)	1.615(3)	A(2)–O(2)	3.432(2) × 12
Be–O(1)	1.694(2) × 4		

причем в идеализированных формулах двух последних среди видообразующих элементов присутствует занимающий позицию в канале цезий. Авдеевит – шестой член группы берилла и первый ее представитель с видообразующим натрием.

Статус самостоятельного минерального вида авдеевит получил лишь в 2019 году, однако, как было показано выше, “щелочной берилл”, в котором сумма крупных катионов в канале (Na, Cs, K, Rb, Ca) превышает 0.5 а.ф., и среди них преобладает Na, известен давно. Примеры химических составов таких образцов приведены в табл. 1, где ан. 1–10 определенно отвечают авдеевиту, а ан. 11 демонстрирует пограничный между авдеевитом и бериллом состав. Изучение литературы показало, что первое описание минерала, относимого сегодня к авдеевиту, вероятно, сделано Ф. Замбонини и В. Кальоти в 1928 г. на образце из Сан-Пьеро-ин-Кампо (Эльба, Италия) (Zambonini, Caglioti, 1928). Этот же образец пока остается и рекордсменом по содержанию Na в бериллах: 4.22 мас. % Na₂O = 0.78 а.ф. Na (табл. 1, ан. 9). К сожалению, его кристаллическая структура не была исследована. Среди ранее охарактеризованных образцов, уверенно относимых нами по химическому составу к авдеевиту, наиболее хорошо изучены “щелочные бериллы” из Вороньих тундр на Кольском полуострове (табл. 1, ан. 2) (Соседко, 1957) и из Магаритры на Мадагаскаре (табл. 1, ан. 3) (Бакакин и др., 1969). Наша работа дополняет представления об этом минерале и закрепляет за ним статус полноправного минерального вида и видовое название авдеевит.

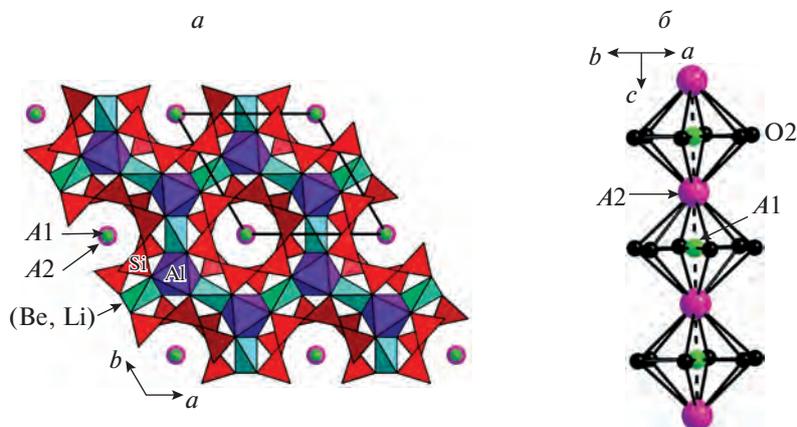


Рис. 4. (а) Кристаллическая структура авдеевита (черной линией показана элементарная ячейка), (б) расположение позиций $A(1)$ и $A(2)$ в широких гофрированных каналах.

Fig. 4. The crystal structure of avdeevite (a ; the unit cell is outlined) and arrangement of the $A(1)$ and $A(2)$ sites in wide, corrugated channel (b).

Из табл. 1 видно, что состав катионов R в канале у авдеевита может, при общем преобладании натрия над каждым из других крупных катионов (обозначаемых нами как R'), заметно колебаться. Главной варьирующей величиной является содержание цезия. Так, в составе высокоцезиевой разновидности авдеевита концентрация Cs_2O составляет 5–8 мас. %, что отвечает 0.21–0.34 а.ф. Cs (ан. 1, 4–8), а в наиболее низкоцезиевой разновидности минерала содержится менее 1 мас. % Cs_2O (до 0.04 а.ф. Cs) (ан. 9, 10); есть и промежуточные по количеству цезия образцы (ан. 2, 3, 11). Содержание K_2O может достигать 2.9 мас. % (= 0.36 а.ф. K: ан. 10), а Rb_2O – 2.0 мас. % (ан. 1). Роль крупных щелочноземельных катионов (Ca, Sr, Ba) в авдеевите незначительна: суммарное количество $R^{2+}O$ не превышает 0.6 мас. % (табл. 1).

Избыток положительного заряда, возникающий при вхождении R -катионов в канал, компенсируется в авдеевите из различных объектов по-разному. Самой типичной (табл. 1) оказалась предложенная для “щелочных бериллов” Н.В. Беловым и Т.Н. Тарховой (1951) изоморфная схема с заменой части бериллия на литий: $Li^+ + R^+ \rightarrow Be^{2+} + [вакансия, H_2O]^0$. Однако известны и бедные литием разновидности “щелочного берилла”, для которых можно предположить компенсацию (хотя бы частичную: табл. 1, ан. 10) зарядового дисбаланса за счет другой схемы замещений: $M^{2+} + R^+ \rightarrow Al^{3+} + [вакансия, H_2O]^0$, где $M^{2+} = Mg, Fe, Mn$.

Как отмечено выше, формулу голотипа авдеевита можно упростить до такой записи: $(Na, Cs)(Be_2Li)Al_2Si_6O_{18} \cdot 0.nH_2O$. В то же время попытка формально идеализировать ее дальше, с переходом к формуле гипотетического конечного члена $Na(Be_2Li)Al_2Si_6O_{18}$ или $[Na(H_2O)](Be_2Li)Al_2Si_6O_{18}$ приводит к достаточно серьезным противоречиям: такие формулы (1) оказываются не вполне корректными с кристаллохимической точки зрения и/или (2) обнаруживают расхождения с эмпирически найденными особенностями химического состава ряда образцов (в части лития и/или воды).

Напомним, что катион Na^+ , находящийся в позиции $A(1)$ ($2b$), должен координироваться, помимо шести атомов O каркаса, двумя молекулами H_2O , которые занимают в этом случае позицию $A(2)$ ($2a$) (Якубович и др., 2009). С учетом этого допущения, формула гипотетического натриевого конечного члена ряда авдеевита могла бы (в случае реализа-

ции изоморфной схемы с заменой $1/3 \text{ Be}^{2+}$ на Li^+) иметь вид $[\text{Na}(\text{H}_2\text{O})](\text{Be}_2\text{Li})\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$, однако в голотипе, где вместе с Na в канале присутствует Cs, содержание H_2O оказывается меньше 0.5 молекулы на формулу, что мешает округлить коэффициент при H_2O до 1.

Приходится констатировать, что ни одна из трех приведенных выше “потенциальных” упрощенных формул, $(\text{Na},\text{Cs})(\text{Be}_2\text{Li})\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18} \cdot 0.n\text{H}_2\text{O}$, $\text{Na}(\text{Be}_2\text{Li})\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$ или $[\text{Na}(\text{H}_2\text{O})](\text{Be}_2\text{Li})\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$, не описывает корректно совокупность анализов авдеевита, приведенных в табл. 1. Кроме факта существования в природе разновидностей минерала с малым содержанием Cs (что само по себе здесь не так важно, поскольку этот элемент не рассматривается как видообразующий), описаны и весьма низколитиевые образцы (табл. 1, ан. 2, 9), для которых в принципе неприменима формула с (Be_2Li) .

Таким образом, учитывая разнообразие и сложность изоморфных замещений, а также не вполне однозначно представляемую пока роль воды, мы приходим к заключению, что записать кристаллохимически корректную и при этом не противоречащую эмпирическим данным формулу конечного члена авдеевита, идеализированную только до видообразующих компонентов, не получается. Наиболее адекватной для этого минерала в целом представляется предложенная выше формула $[(\text{Na},\text{R}')_{0.5-1}(\text{H}_2\text{O})_y]\{(\text{Be},\text{Li})_3(\text{Al},\text{M}^{2+})_2\text{Si}_6\text{O}_{18}\}$, где $y \leq 1$, $\text{R}' = \text{Cs}, \text{Rb}, \text{K}, \text{Ca}$, а $\text{M}^{2+} = \text{Fe}, \text{Mg}, \text{Mn}$.

С химической точки зрения авдеевит, и в первую очередь его голотип, имеет ряд общих черт с пеззоттаитом $\text{Cs}(\text{Be}_2\text{Li})\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$, однако в кристаллохимическом отношении они демонстрируют принципиальные различия. В отличие от авдеевита [и упомянутого выше джонкойвулаита $\text{Cs}(\text{Be}_2\text{V})\text{Mg}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$], пеззоттаит характеризуется упорядочением Be и Li, которое приводит к понижению симметрии от $P6/mcc$ до $R-3c$ с девятикратным увеличением объема элементарной ячейки (Hawthorne et al., 2004; Якубович и др., 2009; Gatta et al., 2012). Отметим, что пеззоттаит — единственный известный сегодня член группы берилла, имеющий симметрию и метрику элементарной ячейки, отличающиеся от собственно берилловых, и вызвано это именно превращением единой в структурах других представителей группы позиции Be, вследствие упорядочения в ней катионов двух сортов в две кристаллографически независимые позиции.

В голотипном авдеевите, несмотря на достаточно высокое содержание Li, замещающего Be, не наблюдается их упорядочения, благодаря чему сохраняется структурный тип собственно берилла. В этом отношении авдеевит близок к воробьевиту — обогащенной Cs, Na (с $\text{Cs} > \text{Na}$ в атомных количествах) и Li разновидности берилла. Название “воробьевит” было предложено В.И. Вернадским в 1908 г. для необычного как по морфологии и окраске (таблитчатые бесцветные и желтовато-розовые кристаллы), так и, главное, по химическому составу (существенное обогащение литием и цезием, а также водой) берилла из редкометальных (редкометально-самоцветных) гранитных пегматитов Липовки на Среднем Урале. Пересчет химического анализа оригинального воробьевита, выполненного К.А. Ненадкевичем (Вернадский, 1908; Ненадкевич, 1911), дает такую эмпирическую формулу: $\text{Cs}_{0.12}\text{Ca}_{0.02}\text{Li}_{0.53}\text{Be}_{2.61}\text{Mg}_{0.01}\text{Al}_{2.05}\text{Si}_{5.98}\text{O}_{18} \cdot 0.61\text{H}_2\text{O}$. О.В. Якубович с соавторами в 2009 г. изучили кристаллическую структуру обогащенного Cs, Na и Li минерала группы берилла из другого среднеуральского объекта — копи Мокруша в Алабашском гранит-пегматитовом поле — и показали, что даже при существенных концентрациях Cs в канале и Li в позиции Be может не происходить Be, Li-упорядочения и, таким образом, сохраняется структурный тип берилла. Было предложено называть воробьевитом именно такой обогащенный одновременно литием, замещающим бериллий, и цезием, преобладающим среди катионов в канале, Be, Li-разупорядоченный минерал, сохраняющий симметрию $P6/mcc$ и метрику ячейки берилла; это придает названию “воробьевит” отчетливый кристаллохимический смысл и, в частности, позволяет терминологически отделять воробьевит от морганита — разновидности, названной исключительно по окраске: термин “морганит” был введен в 1911 году для обозначения розового берилла. Эмпирическая формула (без учета возможной воды: ее содержание, как и количество бе-

риллия, прямыми методами не определялась; количество Ве вычислено исходя из допущения, что сумма Ве + Li = 1.00 а.ф.), структурно изученного образца воробьевита из Мокруши такова: $(\text{Cs}_{0.33}\text{Na}_{0.31})_{\Sigma 0.64}(\text{Be}_{2.57}\text{Li}_{0.43})\text{Al}_{1.92}\text{Si}_{6.01}\text{O}_{18}$ (Якубович и др., 2009). Таким образом, он может рассматриваться, по сути, как Cs-доминантный аналог авдеевита.

В заключение отметим, что авдеевит – пусть и не очень широко распространенный, но все же достаточно характерный минерал редкометалльных (обогащенных Li, Cs, Rb, Ве и Та) гранитных пегматитов, достоверно установленный во многих регионах мира.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, гранты 20-05-00060 (минералогические исследования) и 18-05-00332 (изучение кристаллохимии авдеевита). Порошковое рентгеновское изучение минерала осуществлено на оборудовании ресурсного центра «Рентгенодифракционные методы исследования» СПбГУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авдеев И.В.* О глиции и его соединениях // Горный журн. **1842**. Ч. III. № 9. С. 361–391.
- Бакакин В.В., Рылов Г.М., Белов Н.В.* О кристаллической структуре литийсодержащего берилла // Докл. АН СССР. **1969**. Т. 188. № 3. С. 659–662.
- Бакакин В.В., Рылов Г.М., Белов Н.В.* Рентгенографическая диагностика изоморфных разновидностей берилла // Геохимия. **1970**. № 11. С. 1302–1311.
- Белов Н.В., Тархова Т.Н.* Кристаллическая структура миларита // Тр. Ин-та кристаллографии АН СССР. **1951**. Вып. 6. С. 83–140.
- Бритвин С.Н., Доливо-Добровольский Д.В., Кржижановская М.Г.* Программный пакет для обработки рентгеновских порошковых данных, полученных с цилиндрического детектора дифрактометра Rigaku RAXIS Rapid II // ЗРМО. **2017**. Ч. 146. № 3. С. 104–107.
- Вернадский В.И.* О воробьевите и химическом составе бериллов // Тр. Геологического Музея им. Петра Великого Императорской Академии Наук. СПб. **1908**. Т. 2. Вып. 5. С. 81–102.
- Минералы. Справочник (под ред. Ф.В. Чухрова). Т. III, вып. 2. Силикаты с линейными трехчленными группами, кольцами и цепочками кремнекислородных тетраэдров. М.: Наука, **1981**. 614 с.
- Ненадкевич К.А.* Материалы к познанию химического состава минералов России // Тр. Геологического Музея им. Петра Великого Императорской Академии Наук. СПб. **1911**. Т. 5. С. 37–56.
- Соседко Т.А.* Изменение структуры и свойств в бериллах с повышенным содержанием щелочей // ЗВМО. **1957**. Вып. 4. С. 495–499.
- Соседко Т.А., Франк-Каменецкий В.А.* По поводу структурного типоморфизма щелочных бериллов // Минералогический сборник Львовского государственного университета им. Ив. Франко. **1972**. Вып. 2. № 26. С. 159–170.
- Фекличев В.Г.* Берилл. Морфология, состав и структура кристаллов. М.: Наука, **1964**. 162 с.
- Франк-Каменецкий В.А.* Природа структурных примесей и включений в минералах. Л.: Изд-во Ленинградского университета, **1964**. 240 с.
- Якубович О.В., Пеков И.В., Стил Я.М., Масса В., Чуканов Н.В.* Роль щелочных металлов в формировании производных структурных мотивов на основе берилла: сравнительная кристаллохимия воробьевита и пеззоттаита // Кристаллография. **2009**. Т. 54. № 3. С. 432–445.

Avdeevite, a Na-Dominant Alkali Beryl: Definition as Valid Mineral Species and New Data

A. A. Agakhanov^{a, *}, D. A. Stepanenko^b, N. V. Zubkova^c, L. A. Pautov^a, I. V. Pekov^c,
A. V. Kasatkin^a, V. Yu. Karpenko^a, V. A. Agakhanova^d, R. Škoda^e,
S. N. Britvin^f, and D. Yu. Pushcharovsky^c

^aFersman Mineralogical Museum RAS, Moscow, Russia

^bBelarusian National Technical University, Minsk, Belarus

^cFaculty of Geology, Moscow State University, Moscow, Russia

^dAll-Russian Research Geological Oil Institute, Moscow, Russia

^eDepartment of Geological Sciences, Faculty of Science, Masaryk University, Brno, Czech Republic

^fDepartment of Crystallography, Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

*e-mail: atali99@mail.ru

In this paper the first Na-dominant member of the beryl group named avdeevite is described. The sample, which became its holotype, was found in a granitic pegmatite at the

Kat Chay (Palelni) mine near Momeik township, Kyaukme district, Shan State, Myanmar. Both avdeevite and beryl form sheaf-like aggregates up to 4 cm composed by hexagonal prismatic crystals up to 1 cm long and up to 1 mm thick. These crystals consist of epitactically intergrown avdeevite (core) and beryl (rim). New mineral is pink and transparent with vitreous lustre. The Mohs hardness is 8, $D_{meas} = 2.89(2)$ and $D_{calc} = 2.875 \text{ g/cm}^3$. Avdeevite is optically uniaxial (–), $n_m = 1.601(2)$, $n_p = 1.594(2)$; in transmitted light the mineral is colourless and non-pleochroic. The chemical composition of holotype (electron microprobe, Be, Li and H by ion microprobe, wt %): SiO₂ 61.06, Al₂O₃ 17.40, BeO 8.58, Na₂O 1.77, K₂O 0.09, Cs₂O 6.44, Rb₂O 1.38, Li₂O 2.51, H₂O 0.42, total 99.63. The empirical formula is $(\text{Na}_{0.34}\text{Cs}_{0.27}\text{H}_2\text{O}_{0.14}\text{Rb}_{0.09}\text{K}_{0.01})_{\Sigma 0.85}(\text{Be}_{2.04}\text{Li}_{1.00})_{\Sigma 3.04}\text{Al}_{2.03}\text{Si}_{6.03}\text{O}_{18}$. Taking into consideration previously published data for the samples with compositions corresponding to avdeevite, the simplified formula of this mineral can be most correctly written as: $[(\text{Na}, R')_{0.5-1}(\text{H}_2\text{O})_y]\{(\text{Be}, \text{Li})_3(\text{Al}, M^{2+})_2\text{Si}_6\text{O}_{18}\}$, $y \leq 1$, $R' = \text{Cs, Rb, K, Ca}$, $M^{2+} = \text{Fe, Mg, Mn}$. Crystal structure was studied by single-crystal X-ray diffraction, $R = 0.0322$. The mineral is hexagonal, $P6/mcc$. Unit-cell parameters are: $a = 9.2287(4) \text{ \AA}$, $c = 9.2610(3) \text{ \AA}$, $V = 683.07(5) \text{ \AA}^3$, and $Z = 2$. The strongest lines of the powder X-ray diffraction pattern are $[d, \text{ \AA} (I, \%)(hkl)]$: 7.96 (82) (100), 4.60 (31) (002), 3.99 (102) (200), 3.26 (100) (112), 3.02 (37) (202) (210), 2.866 (84) (211), 1.742 (19) (304) (410). Avdeevite belongs to the beryl structure type. This mineral differs from beryl *sensu stricto* in that the sum of large cations in the channels exceeds 0.5 *apfu* and Na dominates among them. Avdeevite is named after the outstanding Russian chemist and mining engineer Ivan Vasil'evich Avdeev (1818-1865) who contributed a lot to the studies of natural and synthetic compounds of beryllium. The paper also contains data on the history of studies of Na-bearing beryls including earlier described samples which correspond to avdeevite.

Keywords: avdeevite, new mineral, alkali beryl, beryl group, crystal structure, granitic pegmatite, Kat Chay, Momeik, Myanmar

REFERENCES

- Agilent Technologies*. CrysAlisPro Software system, version 1.171.37.35, Agilent Technologies UK Ltd, Oxford, UK. **2014**.
- Artioli G., Rindali R., Ståhl K., Zanazzi P.F. Structure refinements of beryl by single-crystal neutron and X-ray diffraction. *Amer. Miner.* **1993**. Vol. 78. P. 762–768.
- Aurisicchio C., Fioravanti G., Grubessi O., Zanazzi P.F. Reappraisal of the crystal chemistry of beryl. *Amer. Miner.* **1988**. Vol. 73. P. 826–837.
- Aurisicchio C., Conte A. M., De Vito C., & Ottolini L. Beryl from miarolitic pockets of granitic pegmatites, Elba, Italy: characterization of crystal chemistry by means of EMP and SIMS analyses. *Canad. Miner.* **2012**. Vol. 50. P. 1467–1488.
- Avdeev V.I. About glycinium and its compounds. *Gornyi Zhurnal (Mining Journal)*. **1842**. Vol. III. N 9. P. 361–391. (in Russian).
- Bakakin V.V., Rylov G.M., Belov N.V. About crystal structure of lithian beryl. *Doklady USSR Acad. Sci.* **1969**. Vol 188. N 3. P. 659–662 (in Russian).
- Bank H. The emerald occurrence of Miku, Zambia. *J. Gemmology*. **1974**. Vol. 14. P. 8–15.
- Belov N.V., Tarkhova T.N. Crystal structure of milarite. *Proc. Institute of Crystallography USSR Acad. Sci.* **1951**. N 6. P. 83–140 (in Russian).
- Bragg W.L., West J. The structure of beryl, $\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$. *Proc. Roy. Soc. London, Ser. A*. **1926**. Vol. 111. P. 691–714.
- Britvin S.N., Dolvo-Dobrovolsky D.V., Krzhizhanovskaya M.G. Software for processing the x-ray powder diffraction data obtained from the curved image plate detector of Rigaku RAXIS Rapid II diffractometer. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2017**. Vol. 146. N. 3. P. 104–107 (in Russian).
- Černý P., Simpson F.M. The Tanco pegmatite at Bernic Lake, Manitoba. IX. Beryl. *Canad. Miner.* **1977**. Vol. 15. P. 489–499.
- Chukanov N.V., Pekov I.V. Heterosilicates with tetrahedral-octahedral frameworks: Mineralogical and crystal-chemical aspects. *Rev. Miner. Geochem.* **2005**. Vol. 57. P. 105–143.
- Chukanov N.V., Pekov I.V., Khomyakov A.P. Recommended nomenclature for labuntsovite-group minerals. *Eur. J. Miner.* **2002**. Vol. 14. P. 165–173.
- Coombs D.S., Alberti A., Armbruster T., Artioli G., Colella C., Galli E., Grice J.D., Liebau F., Mandarino J.A., Minato H., Nickel E.H., Passaglia E., Peacor D.R., Quartieri S., Rinaldi R., Ross M., Sheppard R.A., Tillmans E., Vezzalini G. Recommended nomenclature for zeolite minerals: Report of the Subcommittee on Zeolites of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names. *Miner. Mag.* **1998**. Vol. 62. P. 533–571.

- Della Ventura G., Rossi P., Parodi G.C., Mottana A., Raudsepp M. and Prencipe M.* Stoppaniite, $(\text{Fe,Al,Mg})_4(\text{Be}_6\text{Si}_{12}\text{O}_{36})\cdot(\text{H}_2\text{O})_2(\text{Na},\square)$, a new mineral of the beryl group from Latium (Italy). *Eur. J. Miner.* **2000**. Vol. 12. P. 121–127.
- Feklichev V.G.* Beryl. Morphology, Composition and Crystal Structure. Moscow: Nauka, **1964**. 162 p. (in Russian).
- Ferraris G., Prencipe M. Rossi P.* Stoppaniite, a new member of the beryl group: crystal structure and crystal-chemical implications. *Eur. J. Miner.* **1998**. Vol. 10. P. 491–496.
- Frank-Kamenetsky V.A.* The Nature of Structural Admixtures and Inclusions in Minerals. Leningrad: Leningrad University Press, **1964**. 240 p. (in Russian).
- Gatta G.D., Adamo I., Meven M., Lambruschi E.* A single-crystal neutron and X-ray diffraction study of pezzottaite, $\text{Cs}(\text{Be}_7\text{Li})\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$. *Phys. Chem. Miner.* **2012**. Vol. 39. P. 829–840.
- Hawthorne F.C., Černý P.* The alkali-metal positions in Cs–Li beryl. *Canad. Miner.* **1977**. Vol. 15. P. 414–421.
- Hawthorne F.C., Cooper M.A., Simmons W.B., Falster A.U., Laurs B.M., Armbruster T., Rossman G.R., Peretti A., Günther D., Grobéty B.* Pezzottaite $\text{Cs}(\text{Be}_7\text{Li})\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$, a spectacular new beryl-group mineral from the Sakavalana pegmatite, Fianarantsoa province, Madagascar. *Miner. Record.* **2004**. Vol. 35. N 5. P. 369–378.
- Laurs B.M., Simmons W.B., Rossman G.R., Quinn E.P., McClure S.F., Peretti A., Armbruster T., Hawthorne F.C., Falster A.U., Günther D., Cooper M.A., Grobéty B.* Pezzottaite from Ambatovita, Madagascar: A New Gem Mineral. *Gems & Gemology.* **2003**. Vol. 39. P. 284–301.
- Levy M.B.* Recherches sur la formation et la composition des émeraudes. *Annales de chimie et de physique.* **1858**. Sér. 3. T. LIII. P. 5–25.
- Mandarino J.A.* The Gladstone–Dale relationship, Part IV. The compatibility concept and its application. *Canad. Miner.* **1981**. Vol. 19. P. 441–450.
- Minerals. Reference book. Silicates with Linear Three-Membered Groups, Rings and Chains of Silicon-Oxygen Tetrahedra. Moscow: Nauka, **1981**. Vol. III. Pt. 2. 614. p. (in Russian).
- Nenaadkevich K.A.* The materials for cognition chemical composition of minerals in Russia. *Proc. Peter the Great Geological Museum Imperial Acad. Sci. St. Petersburg.* **1911**. Vol. 5. P. 37–56 (in Russian).
- Paik M.* Geochemistry and geochronology of granitoid rocks in the Mawpalaw Taung area, Thanbyuzayat Township, southern Myanmar: their petrogenesis and tectonic setting. Geological Society, London: Memoirs, **2017**. Vol. 48. P. 401–412.
- Palke A.C., Henling L.M., Rossman Ma. C., Sun G.R., Renfro N., Thu K., Myo N., Wongrawang P., Weeramonkhonlert V.* Johnkoivulaite, IMA 2019-046. CNMNC Newsletter N 51. *Eur. J. Miner.* **2019**. Vol. 31. No. 5–6. P. 1099–1104.
- Penfield S.L.* On the occurrence of the alkalis in beryl. *Amer. J. Sci.* **1884**. S. 3. Vol. 28. N 163–168. P. 25–31.
- Penfield S.L., Harper D.N.* On the chemical composition of herderite and beryl, with note on the precipitation of aluminum and separation of beryllium and aluminum. *Amer. J. Sci.* **1886**. S. 3. Vol. 32. N 188. P. 107–117.
- Peyronel G.* The crystal structure of Baveno bazzite. *Acta Cryst.* **1956**. Vol. 9. P. 181.
- Sosedko T.A.* Changes in structure and properties of high-alkali beryls. *Zapiski VMO (Proc. All-Union Miner. Soc.)*. **1957**. N 4. P. 495–499 (in Russian).
- Sosedko T.A., Frank-Kamenetsky V.A.* About structural typomorphism of alkali beryls. *Miner. Misc. Iv. Franko Lvov State University.* **1972**. Vol. 2. N 26. P. 159–170 (in Russian).
- Sheldrick G.M.* Crystal structure refinement with SHELXL. *Acta Cryst.* **2015**. Vol. C71. P. 3–8.
- Vernadsky V.I.* About vorobyevite and chemical composition of beryls. *Proc. Peter the Great Geological Museum Imperial Acad. Sci., St. Petersburg.* **1908**. Vol. 2. Iss. 5. P. 81–102 (in Russian).
- Wang R.C., Che X.D., Zhang W.L., Zhang A.C., Zhang H.* Geochemical evolution and late re-equilibration of Na–Cs-rich beryl from the Koktokay #3 pegmatite (Altai, NW China). *Eur. J. Miner.* **2009**. Vol. 21. P. 795–809.
- Yakubovich O.V., Pekov I.V., Steele I.M., Massa W., Chukanov N.V.* Alkali metals in beryl and their role in the formation of derivative structural motifs: Comparative crystal chemistry of vorobyevite and pezzottaite. *Cryst. Rep.* **2009**. Vol. 54. N 3. P. 432–445 (in Russian).
- Zambonini F., Caglioti V.* Ricerche chimiche sulla roosterite di San Piero in Campo (Isola d’Elba) e sui berilli in generale. *Gazzetta chimica italiana.* **1928**. Vol. 58. P. 131–152.
- Zaw K.* Geological evolution of selected granitic pegmatites in Myanmar (Burma): constraints from regional setting, lithology, and fluid-inclusion studies. *Int. Geol. Rev.* **1998**. Vol. 40. P. 647–662.