



О висмутоколумбите из миароловых гранитных пегматитов на Восточном Памире

Паутов А.А.¹, Карпенко В.Ю.¹, Мираков М.А.²,
Алиазаров У.С.³, Шодибеков М.А.², Искандаров Ф.Ш.³

¹Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН, Москва, pla58@mail.ru

²Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии АН РТ, Душанбе

³Главное управление геологии при правительстве Республики Таджикистан, Душанбе

Описаны находки висмутоколумбита в миароловых гранитных пегматитах Ранкульского пегматитового поля на Восточном Памире, Горно-Бадахшанская АО, Таджикистан. Минерал встречен в виде кристаллов до 2 см в миароловых полосках пегматитовых жил Мика, Мальш и в виде вростков 20–30 мкм в Sc-содержащем колумбите-Mn в сростании с эшинитом-(Y) в околомияроловом комплексе пегматита Дорожный. Кристаллы измерены на гониометре, приведены расчетные и измеренные координаты граней (в установке $a < c < b$). Габитус кристаллов призматический, определяется гранями ромбической призмы $m\{110\}$; второстепенные и слабовыраженные грани призматического пояса: пинакоид $\{010\}$, призмы $\{130\}$, $\{150\}$, $\{160\}$, $\{170\}$; обычные грани головки – ромбические призма $i\{101\}$ и дипирамида $u\{111\}$, более редкая призма $f\{032\}$. Цвет висмутоколумбита в кристаллах темно-бурый, почти черный, просвечивает красновато-бурый, в мелких обломках красновато-коричневый до светло-коричневого. Черта светло-коричневая. Спайность совершенная по (010) . Измеренная плотность, г/см³, 7.36(1) (Мальш), 7.61(1) (Мика). Оптически двуосный (+), $2V = 70(10)^\circ$, дисперсия сильная, $r > v$. Плоскость оптических осей перпендикулярна плоскости (010) . Показатели преломления висмутоколумбита из пегматита Мика: $n_p = 2.42(1)$, $n_m = 2.45(1)$, $n_g = 2.50(2)$. В отраженном свете серый со слабым голубоватым оттенком, отражательная способность средняя, анизотропия сильная, рефлексии сильные от желтого до красновато-коричневого. Приведены спектры отражения. Микротвердость $VHN_{100} = 360$ (Мальш), 353 (Мика). Приведены 6 м.з. анализов. Хим. состав (вес.%, выборочные ан., Мальш, Мика, Дорожный): Ta₂O₅ 2.11, 11.66, 8.61; Nb₂O₅ 35.54, 28.11, 8.61; WO₃ 0.08, 0.11, 3.60; TiO₂ 0.02, 0.00, 0.58; PbO 0.10, 0.10, 0.00; SnO₂ 0.03, 0.12, 0.00; MnO 0.00, 0.01, 0.26; FeO 0.03, 0.00, 0.11; Sb₂O₃ 0.78, 1.77, 8.55; Bi₂O₃ 62.50, 57.59, 49.75; сумма 101.19, 99.47, 100.10. Приведены рентгеновские порошкограммы. Параметры ромбической элементарной ячейки (Å): $a = 4.982(2)$, $b = 11.719(4)$; $c = 5.677(2)$ (Мальш); $a = 4.981(2)$, $b = 11.746(4)$; $c = 5.670(2)$ (Мика). Обсуждаются возможные причины большей редкости висмутоколумбита по сравнению со стибикоколумбитом и их Та-аналогами.

Ключевые слова: висмутоколумбит, ряд висмутоколумбит-висмутоганталит, миароловые пегматиты, Ранкульское пегматитовое поле, Шатпутский комплекс, пегматит Мальш, пегматит Мика, пегматит Дорожный, Восточный Памир, река Кукурт, Горно-Бадахшанская автономная область, Таджикистан.

Введение

Висмутоколумбит $BiNbO_4$ (ромб. с.) был открыт в пегматитовой жиле Данбуритовая на Малханском хребте в Ц. Забайкалье, Россия, в виде хорошо об-

разованных мелких кристаллов (до 2 мм) в ассоциации с кварцем, калиевым полевым шпатом, альбитом, полихромным турмалином, данбуритом, касситеритом и богатым висмутом микролитом (Пере-

тяжко и др., 1992). Кристаллическая структура синтетической фазы $\alpha\text{-BiNbO}_4$ расшифрована (Subramanian, Calabrese, 1993). Особенности структуры висмутоколумбита и родственного ему стибикоколумбита и стибитоганталита рассмотрены Н.В. Зубковой с соавторами (Zubkova et al., 2002). До настоящего времени висмутоколумбит остается весьма редким минералом. Кроме первого описания минерала, в доступной литературе удалось найти только два упоминания без приведения каких-либо аналитических данных, подтверждающих диагностику: в перечне минералов из ассоциации с висмутопирохлором в пегматите Мика на В. Памире (Чуканов и др., 1999) и в миароловых пегматитах массива Adamello в Южных Альпах, Италия (Pezzotta, Guastoni, 2002).

Настоящая работа посвящена описанию новых находок висмутоколумбита в миароловых гранитных пегматитах на В. Памире, Таджикистан. Поводом для написания настоящей работы послужило отсутствие в литературе описаний висмутоколумбита с иных мест находок помимо Забайкалья, а также и то, что наряду с мелкими выделениями висмутоколумбита одним из авторов (У.С.А.) были найдены крупные (до 2 см) хорошо образованные кристаллы, пригодные для гониометрического изучения.

Места находок и краткая геологическая характеристика объектов

Висмутоколумбит найден в миароловых гранитных пегматитах Рангкульского пегматитового пояса, расположенного в 45 км к востоку от районного центра – пос. Мургаб (Горно-Бадахшанская АО Республики Таджикистан). Пегматитовое поле расположено в пределах Музкол-Рангкульского антиклинория, в ядре которого обнажается выступ докембрийского фундамента. В пределах этой площади развиты разновозрастные пегматиты от докембрийского до мел-палеогенового возраста (Дмитриев, 1982). Наиболее молодые миароловые пегматиты залегают в экзоконтакте массива лейкократовых гранитов Шатпутского интрузивного комплекса альпийского возраста среди разнообразных осадочно-метаморфических пород: гнейсов, кристаллических сланцев, кварцитов, песчаников, мраморов, метаморфизованных в условиях амфиболитовой и эпидот-амфиболитовой метаморфических фаций (Дмитриев, 1982; Дмитриев, 1983; Росовский и др., 1991; Скрипигиль, 1996; Загорский, Перетьяжко, 1996; Загорский и др., 1999; Коноваленко, 2015, и др.). Висмутоколумбит обнаружен нами в трех миароловых пегматитах: Мика, Малыш и Дорожный.



Рис. 1. Пегматитовые жилы на В. Памире, в которых был обнаружен висмутоколумбит. а – общий вид пегматитовой жилы Мика, вскрытой небольшим карьером; б – пегматитовая жила Малыш (указана красной стрелкой) на опрогах горы Тау; в – вид забоя в небольшом карьере на пегматитовой жиле Малыш; г – стенка карьера на пегматите Дорожный, левый борт р. Кукурт.

Пегматит Мика находится на высоте 5000 м над уровнем моря на водораздельном гребне между долинами рек Мукур и Чверь-Айрык, в 300 м на восток от вершины г. Тау. Пегматит открыт в 1978 году геологом ПО «Памиркварцсамоцветы» А.М. Скрипгителем. Пегматитовая жила прослеживается по простиранию на 800 м по обе стороны водораздельного гребня, а далее теряется под осыпью. Жила имеет плитообразную форму, крутое падение на юго-восток, залегает среди кварцитов, кристаллических сланцев и песчаников бурулюкской свиты (PR₃?brl) протерозойского возраста. Мощность пегматитовой жилы от 2 до 25 м в области раздува, который вскрыт небольшим карьером (рис. 1). В раздуве пегматит имеет зональное строение и содержит многочисленные миароловые полости с кристаллами микроклина, альбита, кварца, шерла, полихромного турмалина, рубелита, топаза, лепидолита, мусковита, боромусковита, апатита, флюорита, кальцита, барита, берилла (ростерита, воробьевита), касситерита, гамбергита, висмутоколуंबита, висмутопироклора и др. (Дмитриев, 1982; Дмитриев, 1983; Россовский и др., 1991; Скрипгитиль, 1996; Золотарев, 1996; Загорский, Перетяжко, 1996; Джураев и др., 1998; Загорский и др., 1998; Чуканов и др., 1999; Коноваленко, 2015, и др.).

Пегматит Мальши расположен на северном склоне г. Тау, в 200 м к северу от вершины и на расстоянии около 1 км на северо-запад от пегматитовой жилы Мика, на высоте 4900 м. Пегматит открыт в 1978 году геологом ПО «Памиркварцсамоцветы» А.М. Скрипгителем. Пегматитовая жила прослежена горными выработками по простиранию на 500 м, далее она скрыта под осыпью (рис. 1). Форма пегматита жильная плитообразная, мощностью от 5 до 35 м в раздуве. Пегматитовая жила является секущей по отношению к вмещающим кварцитовидным песчаникам бурулюкской свиты (PR₃?brl), падение ее крутое (азимут падения 248°, угол падения 55–65°). В области раздува жилы пегматит зонален и содержит миароловые полости размерами до 0,7 × 0,5 × 0,4 м с кристаллами мориона, микроклина, альбита, лепидолита, цветных турмалинов, флюорита, топаза, гамбергита и апатита (Джураев и др., 1998). В блоковом дымчатом кварце и крупнозернистом кварц-микроклиновом агрегате встречаются хорошо образованные кристаллы розового и полихромного берилла.

Пегматит Дорожный расположен на левом борту долины р. Кукурт в среднем ее течении на высоте 4700 м. Проявление открыто в 1982 году геологами партии № 11 ПО «Памиркварцсамоцветы» во время строительства дороги. Небольшим карьером вскрыто несколько жил гранитного пегматита (рис. 1), одна из которых содержит полости с полихромным турмалином, кварцем, гамбергитом. Продуктивная на цветные камни жила прослежена по простиранию на 100 м и имеет мощность до 10–15 м в раздуве. Падение пегматитовой жилы крутое, прак-

тически вертикальное. Вмещающие породы представлены амфибол-биотитовыми кристаллическими сланцами, гнейсами и мраморами сарьджилгинской свиты (PR₃?gr). В раздуве пегматит зонален: в осевой зоне располагается кварцевое ядро, сложенное серовато-белым кварцем, ниже которого находится зона графического пегматита. Под кварцевым ядром встречаются полости неправильной формы с кристаллами мориона, флюорита, полихромного турмалина и гамбергита, вокруг которых полевой шпат представлен амазонитом (Россовский и др., 1991; Джураев и др., 1998; Золотарев, 1996). Акцессорная минерализация богата и представлена Sc-содержащим спессартином, фтор-апатитом, Y-содержащим флюоритом, Sn-содержащим титанитом, магнетитом, уранополикразом и поликразом-(Y), высокоборным гадолинином-(Y), торитом, алланитом-(Ce), икснолитом, манганоколумбитом, пироклором, черновитом-(Y), касситеритом, герценбергитом, варламовитом, лепидолитом, высокогафниевым цирконом, Sc-содержащим тусионитом и др. (Мираков и др., 2018).

Методы исследования

Измерения кристаллов висмутоколуंबита проводились на двукружном отражательном гониометре Чапского фирмы R. Fuess. Для индифференцирования граней и построения проекций кристаллов принята такая же установка, как и при первом описании минерала (Перетяжко и др., 1992), с соотношением осей ромбической ячейки $a < c < b$. Оптическое изучение минерала выполнялось в отраженном и проходящем свете на поляризационных микроскопах Jenapol и Ortholux Leitz. Показатели преломления висмутоколуंबита измерялись в сплавах смеси Se и S в свете Li ($\lambda = 670$ нм). Спектры отражения минерала снимались на микроспектрофотометре UMSP-50 фирмы Opton по стандарту SiC при спектральной ширине щели монохроматора 10 нм. Изучение состава висмутоколуंबита и ассоциирующих минералов проводилось на сканирующем электронном микроскопе JSM-35CF фирмы JEOL с энергодисперсионным Si(Li)-детектором и системой анализа ISIS (Институт геологии, сейсмологического строительства и сейсмологии АН РТ, Душанбе) и на электронном микроанализаторе JCSA-733 фирмы JEOL с пятью волновыми спектрометрами и энергодисперсионным Si(Li)-детектором с системой анализа INCA Energy 350 (Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН, Москва). Количественные анализы с помощью волнодисперсионных спектрометров проводились при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе зонда 25 нА и диаметре пучка 10 мкм. Время счета на пиках по 30 сек, на точках фона по 15 сек. В качестве стандартов использовались: Ti (Ka, PET), Pb (Ma, PET) – PbTiO₃; Mn (Ka, LiF), Ta (Ma, TAP) – MnTa₂O₆; Fe (Ka, LiF), W (La, LiF) – FeWO₄; Nb (La, PET) – Nb мет.; Sn (La, PET) – SnO₂; Sb (La, PET) – Sb₂O₃; Bi (Ma, PET) – Bi₂O₃. Анализы с помощью

энергодисперсионного спектрометра выполнялись при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе зонда 1 нА и диаметре пучка 1 мкм. Микротвердость минерала измерялась на микротвердометре ПМТ-3, тарированном по NaCl. Плотность минерала определялась методом гидростатического взвешивания в воде кристаллов висмутоколумбита. Рентгеновское изучение проводилось методом порошка на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3, Cu-анод, Ni-фильтр, под управлением программно-аппаратного комплекса WinDif.

Описание висмутоколумбита

Висмутоколумбит из пегматитов В. Памира представлен кристаллами из миароловых полостей и мелкими вростками в колумбите-Mn из околониаролового комплекса. Нами изучены два кристалла висмутоколумбита из пегматита Мальш размерами 2×1 и 1.8×1.2 см (рис. 2), фрагмент одного кристалла размером 1×1 см (рис. 3) и небольшой кристалл ($2 \times 2 \times 3$ мм), нарастающий на сросток кристаллов лепидолита из миаролы в пегматите Мика. В пегматите Дорожный встречено лишь одно выделение висмутоколумбита в полированном препарате без элементов кристаллографической огранки размерами 20×30 мкм (рис. 4), заключенное в зональный кристалл Sc-содержащего колумбита-Mn, находящийся в сростании с эцинитом-(Y) в околониароловом комплексе. Малый размер зерна минерала позволил только изучить его оптические свойства в отраженном свете и определить электронно-зондовым методом его химический состав.

Кристаллы висмутоколумбита из пегматита Мальш имеют призматический облик с хорошо развитыми вертикальными гранями ромбической призмы $m \{110\}$; головка образована неравномерно

развитыми гранями ромбических призм $i \{101\}$, $f \{032\}$ и дипирамиды $u \{111\}$. За исключением матовых граней $f \{032\}$, остальные грани блестящие и дают на гониометре хорошие сигналы. Грани ромбической призмы $\{110\}$ покрыты ростовыми выделениями, а также горизонтальной штриховкой, обусловленной наличием ступенек, образованных формами $\{h0\}$, из-за чего наблюдается большой разброс в сигналах. На поверхности грани призмы $\{110\}$ одного из кристаллов имеются разноориентированные удлиненные углубления (рис. 5), которые, возможно, являются поверхностями одновременного роста со слюдой. Участками на гранях кристаллов встречаются полупрозрачные белые воскоподобные корки толщиной 0.1–0.2 мм, сложенные, судя по рентгеновской дифрактограмме и составу, тонколистатым агрегатом лепидолита. В нижних частях кристаллов наблюдаются индукционные поверхности совместного роста с минералами субстрата, на который они нарастают. Оба кристалла имеют залеченный скол по плоскости спайности (010), из-за чего в ортогональном сечении они имеют псевдотригональный облик.

Кристалл висмутоколумбита из пегматита Мика имеет уплощенно-призматический облик с развитой ромбической призмой $m \{110\}$ и относительно равномерно развитыми гранями ромбической призмы $i \{101\}$ и дипирамиды $u \{111\}$. Вертикальный призматический пояс осложнен наличием очень узких граней, дающих почти сплошную полосу сигналов, наиболее яркие из которых соответствуют формам с индексами $\{130\}$, $\{150\}$, $\{160\}$, $\{170\}$ (табл. 1, рис. 3). Часть кристалла сколота по плоскости спайности (010). Координаты граней измеренных кристаллов вместе с расчетными значениями приведены в табл. 1.

Таблица 1. Кристаллографические формы висмутоколумбита с В. Памира

Формы	Усредненные значения		Разброс значений		Теоретические значения*		Кол-во измеренных граней
	φ	ρ	φ	ρ	φ	ρ	
<i>m</i> {110}	67°06'	89°48'	66°54'–67°52'	88°35'–90°45'	66°58.1' 67°01.2' 38°06.0'	90°00'	7
<i>g</i> {130}	38°12'	89°59'			38°10.1'	90°00'	1
<i>z</i> {150}	24°59'	90°11'	24°37'–25°20'	89°51'–90°13'	25°11.7 25°15.0'	90°00'	2
<i>y</i> {160}	21°55'	89°58'	21°51'–21°59'	89°47'–90°09'	21° 24.4' 21° 27.4'	90°00'	2
<i>d</i> {170}	19°11'	90°13'			18°34.4' 18°37.1'	90°00'	1
<i>b</i> {010}	0°02'	89°50'	0°00'–0°24'	89°19'–90°37'	0° 00'	90°00'	3
<i>u</i> {111}	67°07'	50°58'	66°25'–67°50'	50°14'–51°33'	66°58.1' 67°01.2'	51°04.5' 51°02.1'	7
<i>i</i> {101}	90°01'	48°14'	88°08'–91°47'	47°29'–49°05'	90°00'	48°43.9' 48°42.1'	6
<i>f</i> {032}	0°17'	36°24'	–1°18'–1°57'	36°31'–36°39'	0°00'	36°00.2' 35°54.4'	2

Примечание. Жирным шрифтом выделены наиболее часто встречающиеся формы.

* Верхнее значение из приводимых двух рассчитано по параметрам элементарной ячейки висмутоколумбита из пегматита Мальш, нижнее – из пегматита Мика.

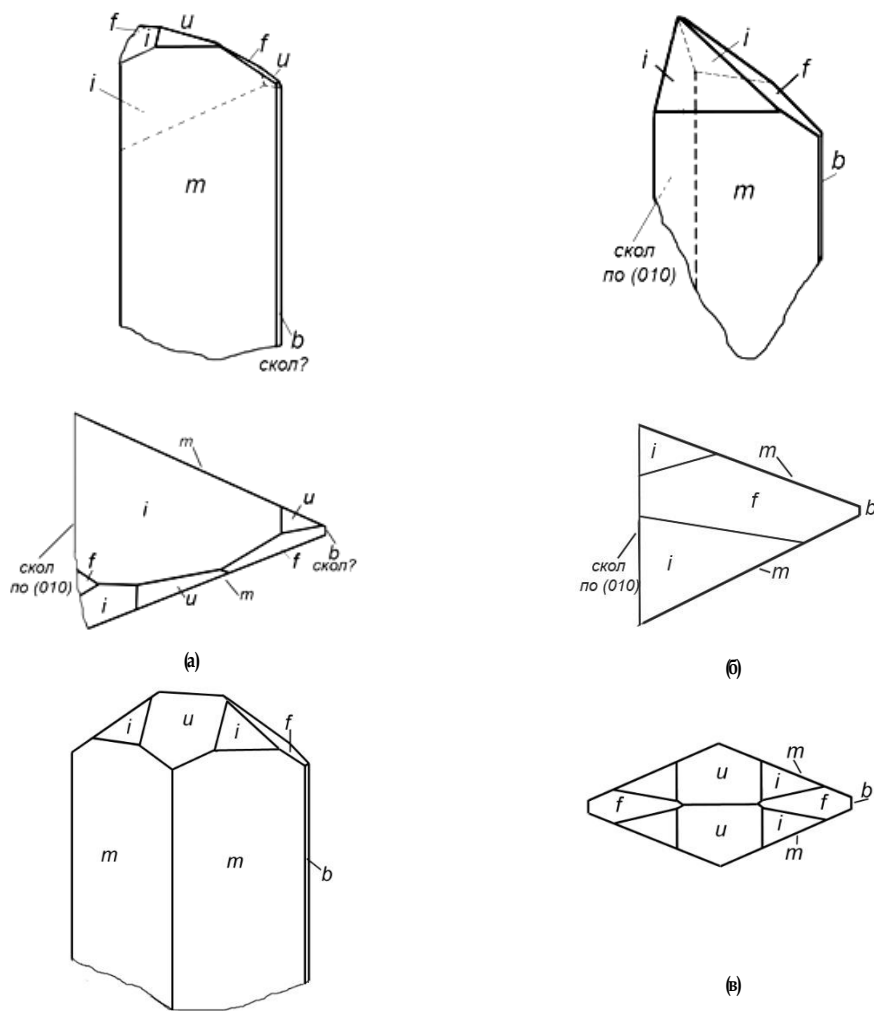


Рис. 2. Кристаллы висмугоколумбита из пегматита Малыш: реальные (а, б), идеализированный (в). Приведены проекции: аксонометрическая и ортогональная на (001).

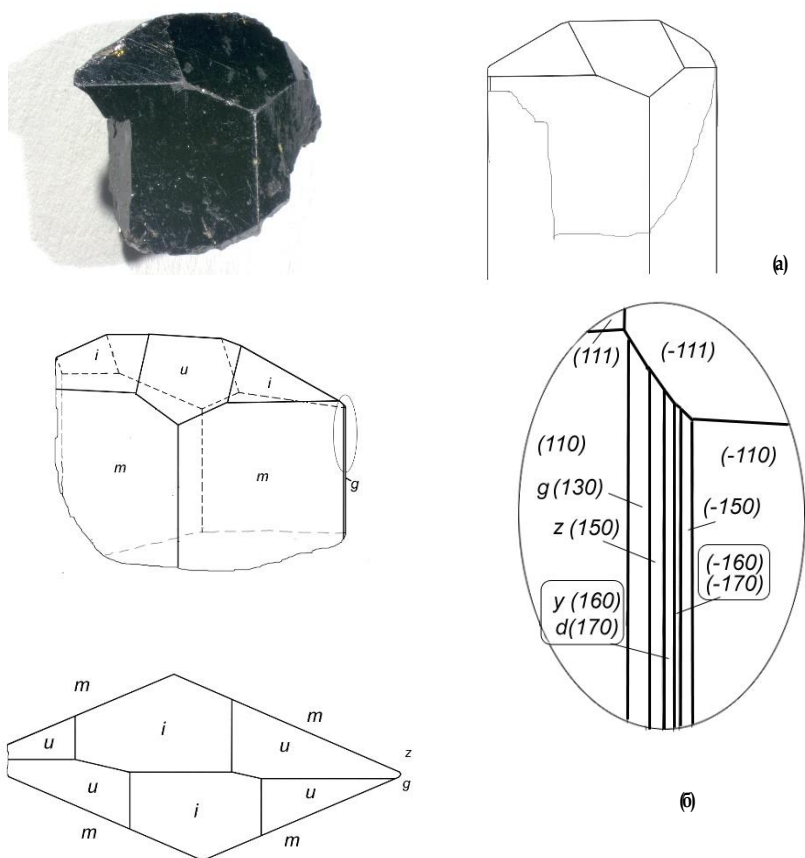


Рис. 3. Кристалл висмутокolumбита из пегматита Мика: а – реальный (фото и чертёж) и б – идеализированный; приведены аксонометрическая и ортогональная проекции, в овале показана детализация вертикального пояса, проекция на плоскость $\{010\}$.

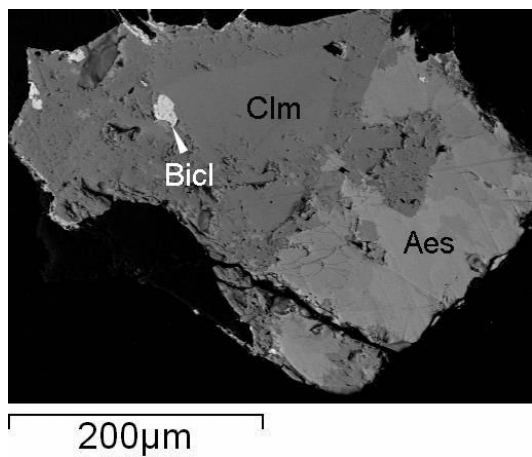


Рис. 4. Висмутокolumбит (Bicl) в зональном кристалле колумбита-(Mn) (Cln) в сростании с эцинитом-(Y) (Aes) из околомарохового комплекса пегматита Дорожный (долина р. Кукурт, В. Памир). Полированный препарат, изображение в режиме BSE.



Рис. 5. Микрорельеф грани $\{110\}$ кристалла висмутокolumбита из пегматита Мальш, В. Памир. Косое освещение. Ширина поля зрения 4 мм.

Цвет висмутоколумбита в кристаллах темно-бурых, почти черный. При сильном боковом освещении кристаллов минерал просвечивает красновато-бурым. Мелкие обломки имеют цвет от красновато-коричневого до светло-коричневого. Черта (цвет порошка) светло-коричневатая, почти белая. Блеск сильный полуметаллический. Излом раковистый. Спайность совершенная по (010), в отличие от указанной спайности по (001) в первом описании минерала (Перетяжко и др., 1992). Минерал оптически двусный положительный с $2V$ около $70(10)^\circ$. Дисперсия осей сильная, $g > v$. Плоскость оптических осей перпендикулярна плоскости (010). Частицы, лежащие на плоскости спайности, дают при конокопическом наблюдении разрезы, перпендикулярные острой биссектрисе. Плеохроизм незаметен. Показатели преломления висмутоколумбита из пегматита Мика: $n_p = 2.42(1)$, $n_m = 2.45(1)$, $n_g = 2.50(2)$. В отраженном свете минерал имеет слабый голубоватый оттенок, отражательная способность средняя, незначительно большая, чем у висмутоколумбита с места первого описания минерала. Спектры отражения приведены на рис. 6. Анизотропия сильная, хорошо заметная на воздухе. Рефлексы сильные от желтого до красновато-коричневого цвета.

Микротвердость висмутоколумбита из пегматита Мальш по 8 замерам при нагрузке 100 г равна VHN 360 (разброс 341–382), из пегматита Мика по 10 замерам VHN 353 (разброс 323–371), что соответствует твердости по Моосу 4.5. Это несколько ниже, чем твердость около 5.5 по Моосу, указанная в первом описании минерала (Перетяжко и др., 1992). Плотность висмутоколумбита измерена методом гидростатического взвешивания и оказалась равной для кристаллов из пегматита Мальш $7.36(1)$ г/см³, из пегматита Мика – $7.61(1)$ г/см³. Расчетная плотность, несмотря на то, что она была вычислена на основании лишь единичных электронно-зондовых анализов, которые не могут отражать валовый состав кристаллов и параметров элементарной ячейки, оказалась тем не менее довольно близка к экспериментальным значениям: 7.29 и 7.62 г/см³ соответственно. Этот факт вполне согласуется с различным Ta/Nb-отношением в висмутоколумбите из пегматитов Мальш и Мика (табл. 3).

Рентгеновские порошкограммы висмутоколумбита и параметры элементарной ячейки, вычисленные методом наименьших квадратов, приведены в табл. 2 и близки к данным для висмутоколумбита с места первого описания.

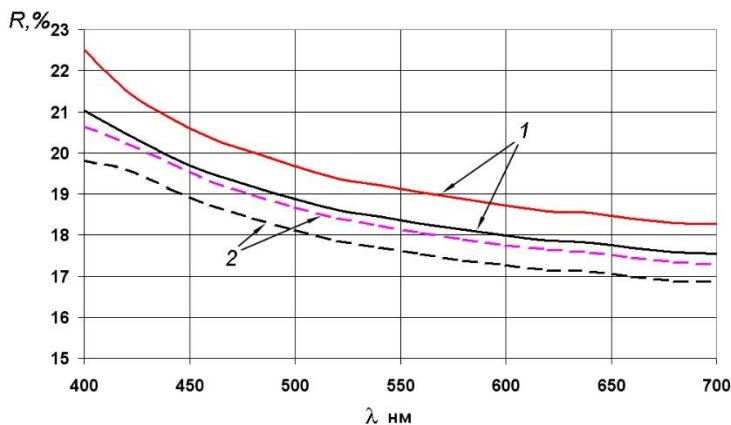


Рис. 6. Спектры отражения висмутоколумбита из пегматитов Мальш (1) и Мика (2), В. Памир.

Химический состав памирского висмутоколумбита в сравнении с составом минерала с места первого описания приведены в табл. 3. Отметим, что приведенные данные относятся к небольшим частицам минерала, отделенным от образцов так, чтобы не нанести заметных повреждений кристаллам, и могут не отражать средний состав индивидов висмутоколумбита. Тем не менее, как указывалось выше, наблюдается более или менее хорошее соответствие приведенных анализов с измеренными физическими свойствами (плотностью, параметрами элементарной ячейки, отражательной способностью) минерала. Наименьшим Ta/Nb-отношением характеризуется висмутоколумбит из

пегматита Мальш, который ближе по этому параметру к конечному члену BiNbO_4 в ряду висмутоколумбит–висмутотанталит, чем минерал с места первого описания из Ц. Забайкалья (рис. 7). Из второстепенных или примесных элементов, кроме сурьмы, практически во всех анализах нашего висмутоколумбита присутствуют Sn, Ti, Pb, W, что характерно как для висмутоколумбита (кроме W) с места первого описания минерала (Перетяжко и др., 1992), так для минералов серии стибикоколумбит–стибитанталит–висмутотанталит (Чистякова и др., 1964; Коноваленко и др., 1982; Stern et al., 1986; Волошин, Пахомовский, 1988; Волошин, 1993; Cerný et al., 2004; Novák et al., 2008, и др.).

Таблица 2. Рентгеновские порошковые программы висмутоколумбита и синтетического BiNbO_4

Висмутоколумбит						$\alpha\text{-BiNbO}_4$ синт.		
Пегматит Мальш, В. Памир, Горно-Бадахшанская АО, Таджикистан		Пегматит Мика, В. Памир, Горно-Бадахшанская АО, Таджикистан		Пегматитовая жила Данбуритовая, Ц. Забайкалье, (Перетяжко и др., 1992)		PDF2-82-0348		
$d, \text{Å}$	I	$d, \text{Å}$	I	$d, \text{Å}$	I	$d, \text{Å}$	I	hkl
5.86	15	5.88	20	5.91	15	5.8570	118	020
4.58	5	4.59	5	4.60	10	4.5814	53	110
3.745	20	3.745	23	3.751	35	3.7417	120	101
3.567	13	3.569	22	3.576	35	3.5642	86	111
3.158	100	3.158	100	3.164	100	3.1531	999	121
3.077	4	3.082	4	3.083	10	3.0722	26	130
2.931	34	2.937	86	2.934	90	2.9285	208	040
2.840	16	2.837	18	2.842	45	2.8365	122	002
2.760	4	2.758	6	2.761	15	2.7568	29	012
2.703	3	2.707	3	2.709	10	2.7015	15	131
2.555	11	2.554	9	2.556	25	2.5528	87	022
2.491	13	2.491	10	2.495	45	2.4890	89	200
2.411	1					2.4116	4	112
2.307	11	2.31	8	2.308	35	2.3061	80	141
2.293	5	2.269	1	2.278	10	2.2907	35	032, 220
2.274	2					2.2715	11	122
2.239	4	2.238	4	2.242	15	2.2373	19	211
2.122	<1					2.1241	2	221
						2.1197	2	150
2.086	2	2.087	1	2.085	3	2.0840	9	132
2.038	13	2.039	9	2.040	35	2.0374	104	042
1.987	2	1.991	2	1.990	5	1.9856	11	151
1.970	4	1.972	1	1.971	5	1.9684	20	231
1.954	2	1.958	3	1.955	5	1.9523	7	060
1.898	16	1.899	12	1.899	40	1.8965	109	240
1.872	17	1.871	17	1.871	40	1.8708	61	202
1.849	9	1.848	10	1.849	25	1.8474	30	212
1.807	2					1.8063	11	052
1.784	11	1.783	7	1.784	40	1.7821	54	222
1.769	15	1.767	9	1.769	45	1.7677	59	103
1.749	5	1.748	5			1.7479	19	113
1.732	32	1.734	22	1.734	80	1.7308	152	161
1.699	1					1.6980	6	152
1.693	12	1.691	9	1.688	35	1.6923	56	123
1.690	10					1.6871	46	232
1.644	3	1.645	1	1.644	5	1.6429	12	310
1.635	3	1.639	1	1.635	5	1.6336	12	251
1.608	6	1.611	4	1.611	15	1.6082	27	062
1.593	3					1.5926	7	301
						1.5862	3	170
1.577	12	1.578	7	1.578	35	1.5765	59	311, 242
1.537	18					1.5368	77	321, 260
1.528	4					1.5276	11	171, 330

Параметры ромбической элементарной ячейки (Å)				
<i>a</i>	4.982(2)	4.981(2)	4.992(3)	4.978(2)
<i>b</i>	11.719(4)	11.746(4)	11.731(5)	11.714(4)
<i>c</i>	5.677(2)	5.670(2)	5.677(3)	5.673(2)

Таблица 3. Химический состав (мас.%) висмутоколумбита из пегматитов В. Памира и с места первой находки

Компо- нент	В. Памир, Горно-Бадахшанская АО, Таджикистан					Ц. Забайкалье, Россия	
	Пегматит 1	Мальш 2	Пегматит Мика 3 4		Пегматит Дорожный 5 6	Пегматит Данбуритовый 7	
Ta ₂ O ₅	2.11	2.00	14.35	11.66	4.73	8.61	11.67
Nb ₂ O ₅	35.54	35.57	25.24	28.11	34.18	28.64	27.03
WO ₃	0.08	н.п.о.	0.22	0.11	0.10	3.60	
TiO ₂	0.02	0.04	0.01	н.п.о.	н.п.о.	0.58	0.06
PbO	0.10	0.09	0.15	0.10	0.17	н.п.о.	0.13
SnO ₂	0.03	0.11	0.12	0.12	0.13	н.п.о.	0.08
MnO	н.п.о.	0.01	0.01	0.01	0.02	0.26	
FeO	0.03	0.02	н.п.о.	н.п.о.	0.02	0.11	
Sb ₂ O ₃	0.78	0.81	0.73	1.77	4.62	8.55	0.28
Bi ₂ O ₃	62.50	62.71	58.42	57.59	56.77	49.75	59.85
Сумма	101.19	101.36	99.25	99.47	100.74	100.10	99.10
Формульные коэффициенты при расчете на O = 4							
Bi ⁺³	0.97	0.97	0.98	0.94	0.88	0.77	0.99
Sb ⁺³	0.02	0.02	0.02	0.05	0.11	0.21	0.01
Pb ⁺²	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mn ⁺²	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	
Fe ⁺²	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	
∑ A	0.99	0.99	1.00	0.99	0.99	1.00	1.00
Nb ⁺⁵	0.97	0.97	0.74	0.80	0.92	0.78	0.79
Ta ⁺⁵	0.03	0.03	0.25	0.20	0.08	0.14	0.21
Ti ⁺⁴	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00
Sn ⁺⁴	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
W ⁺⁶	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	
∑ B	1.00	1.00	0.99	1.00	1.00	1.01	1.00
Ta/Nb ат.	0.031	0.031	0.338	0.250	0.087	0.179	0.266

Примечание. н.п.о. - содержание компонента ниже предела обнаружения, пустая клетка означает отсутствие данных; м.з. ан. 1-6 - наши данные; 1-5 выполнены на волнодисперсионных спектрометрах, 6 - с помощью энергодисперсионного спектрометра, 7 - м.з. ан. из (Перетяжко и др., 1992).

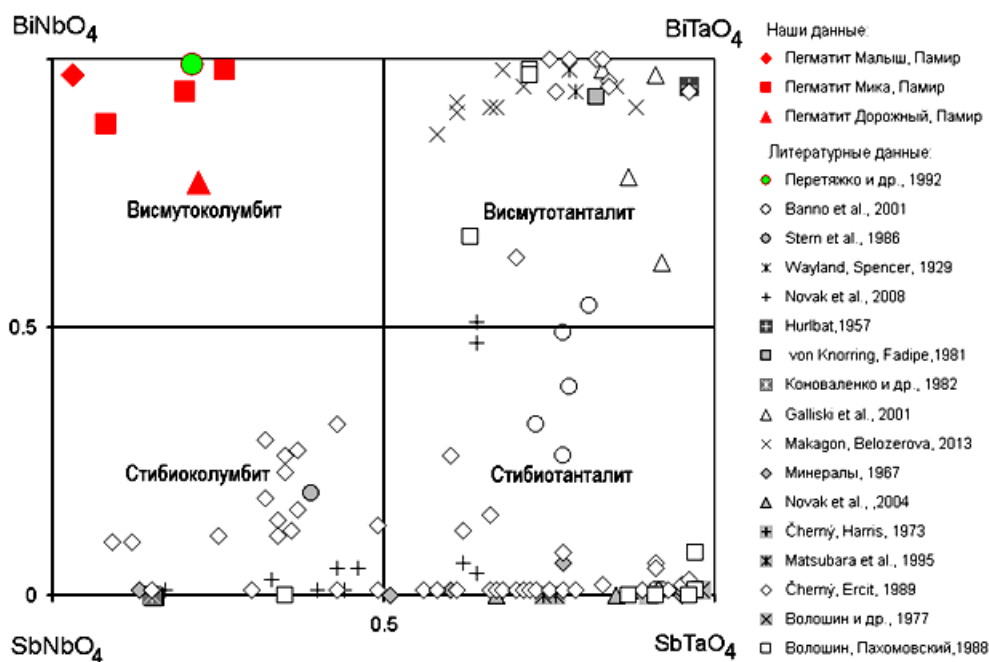


Рис. 7. Состав минералов в серии висмутоколумбит-висмутотанталит-стибиоколумбит-стибиотанталит. Красные знаки соответствуют составам висмутоколумбита с В. Памира (наши данные). Остальные знаки соответствуют составам минералов этой системы, заимствованным из литературы. Зеленый знак - состав висмутоколумбита с места первого описания минерала из пегматитовой жилы Данбуритовая, Ц. Забайкалье, Россия (Перетяжко и др., 1992).

Выводы и обсуждение

В гранитных миароловых пегматитах Ранкульского пегматитового поля на В. Памире диагностирован висмутоколумбит не только в пегматитовой жиле Мика, где он упоминался ранее без описания (Чуканов и др., 1999), но и в пегматитах Мальш и Дорожный. По-видимому, наше описание висмутоколумбита является вторым после описания его в пегматите Данбуритовый в Ц. Забайкалье (Перетяжко и др., 1992).

Габитусной формой в кристаллах висмутоколумбита, определяющей их призматический облик, является ромбическая призма $m\{110\}$; грани ее покрыты видциналами, ростовыми формами и ступенями, усложняющими картину сигналов. Вертикальный пояс кристалла из пегматита Мика осложнен целой серией узких граней призм $\{k0\}$ ($k = 3, 5, 6, 7$). Некоторые фрагменты кристаллов сколоты по плоскости спайности (010), что придает сечению кристаллов в ортогональной проекции псевдотригональный вид (пегматит Мальш). Головки кристаллов ограничены в основном ромбической призмой $i\{101\}$ и дипирамидой $u\{111\}$, а на кристаллах из Мальша встречается еще и форма $f\{032\}$. Следует отметить крайне неравномерное развитие граней на головках кристаллов из пегматита Мальш в отличие от такового из пегматита Мика.

Физические свойства висмутоколумбита с Па-

мира близки к свойствам минерала с места его первого описания, из Ц. Забайкалья. Совершенная спайность проявлена по плоскости (010), а не (001), как, вероятно, ошибочно было указано в первом описании минерала из Ц. Забайкалья (Перетяжко и др., 1992). Отметим, что на известных интернет-ресурсах www.mindat.org, www.wiki.web.ru для висмутоколумбита приводится спайность по (010) при выборе осей $a < b < c$, что соответствует той же плоскости спайности, что и в первом описании минерала (Перетяжко и др., 1992). Наш висмутоколумбит характеризуется большими вариациями цвета – до светло-коричневого, и соответственно имеет более светлую черту, чем минерал из Забайкалья. Не исключено, что в будущем будет найден бесцветный висмутоколумбит. Это кажется весьма вероятным, если учитывать, что синтетическая фаза α - BiNbO_4 бесцветна (Subramanian, Calabrese, 1993).

Висмутоколумбит BiNbO_4 образует серию твердых растворов с висмутотанталитом VbTaO_4 , стибиоколумбитом SbNbO_4 , стибиотанталитом SbTaO_4 (рис. 7), причем танталовые члены этого ряда распространены в природе гораздо шире ниобиевых (Wayland, Spencer, 1929; Hurlbut, 1957; Чистякова и др., 1964; Горжевская и др., 1974; Stern et al., 1986; Загорский, Перетяжко, 1991; Загорский и др., 1999; Banno et al., 2001; Galliski et al., 2001; Певков, Меметова, 2008; Novák et al., 2008; Makagon,

Belozergova, 2013, и др.). Причина этого явления недостаточно ясна. Возможно, редкость висмутоколумбита связана с тем, что в ходе развития пегматитовых систем обычно растет Ta/Nb-отношение (Кузьменко, Еськова, 1968; Горжевская и др., 1974, Волошин, 1993, и др.) и к поздним стадиям, когда висмут накапливается в минералообразующей среде, тантал начинает резко преобладать над ниобием. Такое объяснение может быть справедливо только отчасти, так как не редки случаи, когда происходит реверс Ta/Nb-отношения в ходе пегматитообразования (Кузьменко, Еськова, 1968). Обратная зональность кристаллов минералов группы колумбита, когда более низким отношением Ta/Nb характеризуются краевые зоны по сравнению с центральными частями кристалла, изучена А.В. Волошиным и Я.А. Пахомовским (1988) в образцах из пегматитов Колесского полуострова, Казахстана, Памира и объясняется ими не столько соотношением тантала к ниобию в минералообразующей среде, сколько другими физико-химическими условиями, в первую очередь такими, как щелочность/кислотность, температура и скорость кристаллизации.

Возможно, объяснения редкости висмутоколумбита лежат в области кристаллохимии. А.В. Волошин (1993) связывает неустойчивость кристаллических структур минералов группы стибитантала с наличием в них смешанной ионно-ковалентной связи. Различия в распространенности стибито-

висмутоколумбита в какой то мере, возможно, обусловлены значительной разницей в ионных радиусах Bi^{3+} и Sb^{3+} . Наблюдаются различия между сурьмяными и висмутовыми соединениями со структурным типом стибитантала: SbTaO_4 и SbNbO_4 кристаллизуются в нецентросимметричной пространственной группе $Pna2_1$, а висмутоколумбит $\alpha\text{-BiNbO}_4$ характеризуется центросимметричной группой $Pnma$ (Zubkova et al., 2002). Не исключено, что большая распространенность танталовых представителей этой группы минералов по сравнению с ниобиевыми (рис. 7) связана со значительными различиями (при близком ионном радиусе Nb^{5+} и Ta^{5+}) в кристаллохимии ниобия и тантала: сильно проявленной тенденцией Nb формировать существенно неравноценные связи Nb–O, а у Ta столь же сильной противоположной тенденцией к образованию равноценных связей Ta–O (Волошин, 1993; Пятенко и др., 1999).

Благодарности

Авторы благодарят за помощь в проведении полевых работ Ф.К. Рахими, Р.У. Сабирову, Р.Д. Бахтдавлатову, А.Р. Файзиёву, С. Махмадшарифа, С.А. Эльназарова, Ф.А. Малахова и Н.С. Сафаралиева, за обсуждение и ценные замечания – И.В. Пеккова.

Список литературы

Волошин А.В., Гордиенко В.В., Гельман Е.М., Зорина М.А., Елина Н.А., Кузьмитская Е.А., Меньшиков Ю.П., Полежаева Л.И., Рыкова Р.И., Соколова П.Б., Уточкина Г.И. Холит (первая находка в СССР) и его взаимоотношения с другими минералами тантала в редкометаллических пегматитах // ЗВМО. 1977. Вып. 3. С. 337–347.

Волошин А.В., Пахомовский Я.А. Минералогия тантала и ниобия в редкометаллических пегматитах. Л.: Наука, 1988. 240 с.

Волошин А.В. Тантало-ниобаты. Систематика, кристаллохимия и эволюция минералообразования в гранитных пегматитах. СПб.: Наука, 1993. 298 с.

Горжевская С.А., Сидоренко Г.А., Гинзбург А.И. Титано-тантало-ниобаты (свойства, особенности состава и условия образования). М.: Недра, 1974. 344 с.

Джураев З.Т., Золотарев А.А., Пеков И.В., Фролова А.В. Гамбергит из пегматитовых жил Восточного Памира // ЗРМО. 1998. Вып. 4. С. 132–139.

Дмитриев Э.А. Генетические типы камнесамоцветной минерализации Центрального Памира // Докл. АН СССР. 1982. Т. 266. № 3. С. 691–694.

Дмитриев Э.А. Гранитные пегматиты Восточного Памира и особенности их камнесамоцветной

минерализации // Известия Академии наук Таджикиской ССР. Серия геологических и физико-технических наук. 1983. № 3(89). С. 73–81.

Загорский В.Е., Перетяжко И.С. Месторождения турмалина России и Таджикистана // Геология и геофизика. 1996. Т. 37. № 10. С. 36–50.

Загорский В.Е., Перетяжко И.С., Сапожников А.Н. Богатые бором слюды и хлориты из миароловых пегматитов // ЗВМО. 1998. № 6. С. 55–68.

Загорский В.Е., Перетяжко И.С., Шмакин Б.М. Гранитные пегматиты. Новосибирск: Наука, 1999. Т. 3. Миароловые пегматиты. 488 с.

Золотарев А.А. Ювелирный и коллекционный турмалин с Памира (кристалломорфология, окраска, кристаллохимия) // ЗВМО. 1996. № 4. С. 32–46.

Коноваленко С.И., Волошин А.В., Пахомовский Я.А., Россовский Л.Н., Ананьев С.А. Вольфрамсодержащие разновидности танталониобатов из миароловых гранитных пегматитов Юго-Западного Памира // Минералогический журнал. 1982. Т. 4. № 1. С. 65–74.

Коноваленко С.И. Турмалин пегматитов Памирской камнесамоцветной провинции // Геммология: Сборник статей. Томск: Изд-во Томского ЦНТИ, 2015. С. 106–115.

- Кузьменко М.В., Еськова Е.М. Тантал и ниобий. М.: Наука, 1968. 342 с.
- Минералы. Справочник. Том 2. Вып. 3. Сложные окислы, титанаты, ниобаты, антимонаты, гидроксиды / Ред.: Ф.В. Чухров, Э.М. Бонштедт-Куплетская. М.: Наука, 1967. 676 с.
- Мираков М.А., Паутов Л.А., Шодибеков М.А., Плечов П.Ю., Карпенко В.Ю. Новая скандийсодержащая разновидность тусионита с восточного Памира (Таджикистан) // ЗРМО. 2018. № 4. С. 84–96.
- Пеков И.В., Меметова Л.Р. Минералы гранитных пегматитов Липовки, Средний Урал, Россия // Минералогический альманах. 2008. Вып. 13. С. 6–45.
- Перетяжко И.С., Загорский В.Е., Сапожников А.Н., Бобров Ю.Д., Ракчеев А.Д. Висмутоколумбит $\text{Bi}(\text{Nb}, \text{Ta})\text{O}_4$ – новый минерал из миароловых пегматитов // ЗВРМО. 1992. № 3. С. 130–134.
- Пятенко Ю.А., Курова Т.А., Черницова Н.М., Пудовкина З.В., Блинов В.А., Максимова Н.В. Ниобий, тантал и цирконий в минералах. М.: Изд. ИМГРЭ, 1999. 213 с.
- Росовский Л.Н., Морозов С.А., Скригитиль А.М. Особенности формирования миароловых пегматитов Восточного Памира // Изв. АН СССР. Серия геологическая. 1991. № 5. С. 92–103.
- Скригитиль А.М. Драгоценные камни в пегматитах Восточного Памира // Мир камня. 1996. № 11. С. 16–25.
- Чистякова М.Б., Казакова М.Е., Уханов Е.В. Новая находка стиббиотанталита // Тр. Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана АН СССР. Минералы СССР. М.: Наука, 1964. Вып. 15. С. 251–255.
- Чуканов Н.В., Скригитиль А.М., Кузьмина О.В., Задов А.Е. Висмутопирохлор $(\text{Bi}, \text{U}, \text{Ca}, \text{Pb})_{1-x}(\text{Nb}, \text{Ta})_{20}\text{O}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$ – новый минерал из пегматитовой жилы Мика (Восточный Памир) // ЗВРМО. 1999. № 4. С. 36–41.
- Banno Y., Bunno M., Haruna M., Oba M. Stibiotantalite-group minerals in a lithium pegmatite from Nagatare, Fukuoka Prefecture, Japan // Journal of mineralogical and petrological sciences. 2001. 96(5). P. 205–209.
- Chemý P., Harris D.C. Tapiolite, stibiotantalite and antimonian microlite from the Odd West pegmatite, southeastern Manitoba // Canadian Mineralogist. 1973. Vol. 12. P. 76–78.
- Chemý P., Erat T.S. Mineralogy of niobium and tantalum: crystal chemical relationships, paragenetic aspects and their economic implication. // Lanthanides, Tantalum and Niobium / P. Miller, P. Černý and F. Saupé, eds. Springer Verlag, New York. 1989. P. 195–239.
- Cemy P., Chapman R., Ferreira K., Smeds S.A. Geochemistry of oxide minerals of Nb, Ta, Sn, and Sb in the Varuträsk granitic pegmatite, Sweden: The case of an “anomalous” columbite-tantalite trend // American Mineralogist. 2004. Vol. 89. № 4. P. 505–518.
- Galliski M.A., Marquez-Zavalía M.F., Cooper M.A., Cemy P., Hawthorne F.C. Bismutotantalite from north-western Argentina: description and crystal structure // Canadian Mineralogist. 2001. Vol. 39. P. 103–110.
- Hurlbut C.S. Bismutotantalite from Brazil // Amer. Mineral. 1957. Vol. 42. P. 178–183.
- Makagon V.M., Belzerova O.Yu. Bismutotantalite from pegmatites of the Western Baikal region, East Siberia, Russia // PEG 2013: The 6-th International Symposium on Granitic Pegmatites. 2013. P. 88–89.
- Matsubara S., Kato A., Matsuyama F. Nb-Ta minerals in a lithium pegmatite from Muokenzan, Ibaraki Prefecture, Japan // Mineralogical Journal. 1995. Vol. 17(7). P. 338–345.
- Novák M., Čemy P., Čempírek J., Šrein V., Filip J. Ferrotapiolite as a pseudomorph of stibiotantalite from the Laštovičky lepidolite pegmatite, Czech Republic; an example of hydrothermal alteration at constant Ta/(Ta+Nb) // Canadian Mineralogist. 2004. Vol. 42. P. 1117–1128.
- Novák M., Sejkora J., Škoda R., Budína V. Bismutotantalite-stibiotantalite-stibiocolumbite assemblage from elbaite pegmatites at Molo near Momeik, northern Shan State, Myanmar // Neues Jahrbuch für Mineralogie-Abhandlungen: Journal of Mineralogy and Geochemistry. 2008. 185(1). P. 17–26.
- Pezzotta F., Guastoni A. Adamello: la pegmatite miarolitica LCT della valle Adamè // Rivista Mineralogica Italiana. 2002. № 3. P. 126–142.
- Stem L.A., Brown Jr G.E., Bird D.K., Jahns R.H., Foord E.E., Shigley J.E., Spaulding Jr L.B. Mineralogy and geochemical evolution of the Little Three pegmatite-aplite layered intrusive, Ramona, California // American Mineralogist. 1986. 71(3/4). P. 406–427.
- Subramanian M.A., Calabrese J.C. Crystal structure of the low temperature form of bismuth niobium oxide $[\alpha\text{-BiNbO}_4]$ // Materials research bulletin. 1993. Vol. 28. № 6. P. 523–529.
- von Knorring O., Fadipe A. On the mineralogy and geochemistry of niobium and tantalum in some granite pegmatites and alkali granites of Africa // Bulletin de la Société française de minéralogie et de Cristallographie. 1981. V. 104. P. 496–507.
- Wayland E.J., Spencer L.J. Bismutotantalite, a new mineral from Uganda // Miner. Mag. 1929. № 127. Vol. 22. P. 185–192.
- Zubkova N.V., Pushcharovsky D.Yu., Gester G., Smolin A.S., Tillmanns E., Brandstätter F., Hammer V., Peretyazhko I.S., Sapozhnikov A.N., Kashaev A.A. Bismutocolumbite, $\text{Bi}(\text{Nb}_{0.79}\text{Ta}_{0.21})\text{O}_4$, stibiocolumbite, $\text{Sb}(\text{Nb}_{0.67}\text{Ta}_{0.33})\text{O}_4$, and their structural relation to the other ABO_4 minerals with stibiotantalite (SbTaO_4) structure // Neues Jahrbuch für Mineralogie Monatshefte. 2002. H. 4. P. 145–159.