

**ТУРМАЛИН ИЗ ПОЗДНИХ КВАРЦЕВЫХ ЖИЛ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЗОЛОТА
МУРТЫКТЫ, РЕСПУБЛИКА БАШКОРТОСТАН****М.А. Рассомахин, Е.В. Белогуб, К.А. Новоселов, П.В. Хворов***Южно-Уральский федеральный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, Институт минералогии,
г. Миасс, Челябинская обл., 456317 Россия; Miha_Rassomahin@mail.ru***TOURMALINE FROM LATE QUARTZ VEINS OF THE MURTYKTY GOLD DEPOSIT,
REPUBLIC OF BASHKORTOSTAN****M.A. Rassomakhin, E.V. Belogub, K.A. Novoselov, P.V. Khvorov***South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS,
Institute of Mineralogy, Miass, Chelyabinsk oblast, 456317 Russia; Miha_Rassomahin@mail.ru*

Изучен турмалин – промежуточный член ряда оксишерл-оксидравит-оксимагнезиофойтит-бозиит с преобладанием оксидравитового-бозиитового миналов из поздних кальцит-кварцевых жил Восточной зоны месторождения золота Муртыкты (Республика Башкортостан). Сульфидная минерализация в этих жилах представлена единичными халькопиритом, пиритом, сфалеритом и галенитом. Среди аксессуарных минералов установлены ксенотим-(Y), ванадийсодержащий рутил и тонкое высокопробное золото. Гипергенная минерализация, связанная с разложением карбонатов, сульфидов и породообразующих силикатов, представлена каолинитом, гидроксидами Mn (халькофанит, псиломелан) и Fe (гетит, рентгеноаморфные лимонитовые охры), развитыми преимущественно в полостях жилы; халькопирит замещается купритом и малахитом. Состав изученного турмалина близок к метаморфогенному дравиту орогенных золоторудных месторождений и турмалину золото-порфириковых месторождений, переходных от порфириковых к эпитермальным. Рассматривается два вероятных источника B для образования турмалина: осадки палеоостроводужного комплекса и гранодиориты Мансуровского массива.

Илл. 9 Табл. 1 Библ. 36

Ключевые слова: турмалин, бор, золото, ксенотим-(Y), Муртыкты, Башкортостан

Tourmaline, an intermediate member of the oxyschorl–oxydravite–oxymagnesio-foitite-bosiite series with a predominance of the oxy-dravite-bosiite end-member, was studied from late calcite-quartz veins in the eastern zone of the Murtykty gold deposit (Republic of Bashkortostan). Sulfide mineralization in veins includes rare chalcopyrite, pyrite, sphalerite and galena. Accessory minerals are xenotime-(Y), vanadium-containing rutile and fine high-fineness gold. Supergene mineralization resulted from decomposition of carbonates, sulfides and rock-forming silicates includes kaolinite, hydroxides of Mn (chalcophanite, psilomelane) and Fe (goethite and limonite ochers), mainly developed in vein cavities; chalcopyrite is replaced by cuprite and malachite. The composition of tourmaline is close to metamorphic dravite of orogenic gold deposits and tourmaline of gold-porphyry deposits, transitioning from porphyry to epithermal. Two possible B sources for the formation of tourmaline are considered: sedimentary rocks of the paleoisland-arc complex and granodiorites of the Mansurovo pluton.

Figures 9. Table 1. References 36.

Key words: tourmaline, boron, gold, xenotime-(Y), Murtykty deposit, Republic of Bashkortostan.

Введение

Турмалин встречается во многих геологических обстановках. Он образуется в магматических породах, пегматитах, метасоматитах, гидротермальных жилах и метаморфических породах в широком диапазоне РТ-условий (Henry, Guidotti, 1985; Koval et al., 1991; Hinsberg et al., 2011; Slack, Trumbull, 2011). Кристаллохимическая формула супергруппы турмалина $X(Y_3)Z_6(T_6O_{18})(BO_3)_3V_3W$, где позиция X занята крупными катионами (Ca, Na, K, Pb) или вакантна, Y – средними или мелкими катионами с зарядом +2 и +3 (Al, Fe²⁺, Fe³⁺, Li, Mg²⁺, Mn²⁺, Ti), Z – мелкими катионами с зарядом +3, T – Si с незначительной возможностью замещения на В и Al, V – гидроксильной группой, W – как гидроксил, так и O²⁻ и F (Henry et al., 2011). Для турмалина свойственны широкие изоморфные замещения, в частности в позиции Y , и связанная с ними возможность упорядочения катионов в позиции Y (Watenphul et al., 2016; Vereshchagin et al., 2018).

Основной поток информации о турмалинах до недавнего времени был связан с изучением гранитов и связанных с ними пегматитов (London et al., 1996; Henry, Dutrow, 2018). В то же время, типоморфные особенности турмалина из месторождений цветных и благородных металлов рассматривались в работах В.И. Кузьмина с соавторами (1979), Ф. Пирайно и Р. Смайтиса (Pirajno, Smithies, 1992), И.А. Бакшеева с соавторами (Baksheev et al., 2012 и др.) и многими другими. В результате этих исследований наиболее детально были изучены турмалины медно-порфириновых и медно-молибден-порфириновых месторождений (Бакшеев, Плотинская, 2011; Baksheev et al., 2012, Voudouris et al., 2019) и жильных олово-вольфрамовых месторождений, связанных с гранитоидным магматизмом (Pirajno, Smithies, 1992; Jiang et al., 2008; Nekouvaght Tak, Bazargani-Guilani, 2009). Орогенные месторождения золота также часто сопровождаются турмалиновой минерализацией (Dommang et al., 1993; Deksissa, Koeberl, 2002; Hazarika, Mishtra, 2015).

На основе обработки большого количества анализов В.И. Кузьминым с соавторами (1979) показано, что примесь Mn характерна для турмалина из редкометалльных месторождений, в то время как его содержания в турмалине из оловорудных и полиметаллических ассоциаций не превышают 0.2 мас. % (в среднем, 0.05 и 0.04 мас. %, соответственно). Для кварцево-жильных месторождений Sn и Sn-W Намибии установлено, что шерл

со значением FeO / (FeO + MgO) 0.8–1.0 типичен для жильных систем оловоносных гранитов, в то время как турмалин этого же ряда, но с повышенным содержанием Mg, характерен для удаленных от гранитов, но генетически связанных с ними жил с отношением FeO / (FeO + MgO) = 0.6–0.8 (Pirajno, Smithies, 1992). Сходная картина установлена для оловорудного месторождения Хнилек (Словакия), где на основании изучения изотопии В было показано увеличение содержания дравитового минала в турмалине поздних стадий рудообразования, когда в процесс, помимо магматогенного, вовлекался также метаморфогенный флюид (Jiang et al., 2008).

Турмалин из медно- и медно-молибден-порфириновых месторождений характеризуется секториальностью и осцилляторной зональностью, часто образует несколько генераций с постепенным возрастанием магнезиальности. Для него также характерны повышенные содержания Cu и Sn (Baksheev et al., 2012). Турмалин из золото-сульфидно-кварцевых и золотосодержащих порфириновых месторождений Забайкалья и Монголии соответствует окситурмалину серии шерл-дравит с характерным повышенным содержанием примеси As (Koval et al., 1991). На Cu-Au-Мо месторождении Факос (Греция) турмалин из серицитовых метасоматитов принадлежит серии оксидравит-оксишерл и обогащен железом по сравнению с оксидравитом-магнезиофойтитом из цемента более поздних брекчий, что трактуется как свидетельство промежуточного положения месторождения между порфириновыми и эпitherмальными (Voudouris et al., 2019).

Турмалин золоторудных месторождений изучен слабее. На орогенном месторождении золота Хатти (зеленокаменный пояс Хатти-Маски, Индия) турмалин представлен дравит-оксидравитом с отношением Mg / (Mg + Fe) = 0.77 и значительным дефицитом заполнения позиции А, что рассматривается как свидетельство его кристаллизации из метаморфогенных, богатых Mg флюидов с низкой соленостью (Hazarika, Mishtra, 2015). Турмалин, образованный при диагенезе и низкотемпературном метаморфизме, имеет, преимущественно, дравитовый-оксидравитовый состав, хотя он может наследовать повышенные содержания Fe обломочного турмалина гранитоидного происхождения (Henry, Dutrow, 2012).

На рудных месторождениях Урала турмалин как основной концентратор В описан на Березовском и Кочкарском месторождениях золота, связанных с гранитоидным магматизмом, и Еленовском

медно-порфировом месторождении. Однако, борная минерализация известна также и на месторождениях, локализованных в вулканогенно-осадочных толщах. Находки аксинита известны на Учалинском медноколчеданном месторождении (Плетнев, 1995а), Уразовском и Кожаевском месторождениях марганца (Барсанов, 1951; Плетнев, 1995б). Вопрос происхождения борной минерализации и, в частности, турмалина в вулканогенно-осадочных комплексах Южного Урала остается открытым.

Первые находки обломков кристаллов кварца с включениями турмалина на горе Муртыкты (Республика Башкортостан) были сделаны в 80-х годах XX в. В 1999 г. при вскрышных работах в карьере Восточной зоны месторождения золота Муртыкты (восточный склон одноименной горы) геологом Башкирской золотодобывающей компании И.Б. Купцовым были обнаружены жилы кварца с включениями карбонатов и игольчатого голубовато-серого минерала, предположительно определенного им как турмалин.

Цель работы – установление генезиса поздних турмалиносодержащих жил на месторождении золота Муртыкты на основе выявления типоморфных особенностей турмалина и оценки условий его формирования.

Методы исследования

Образцы жил для исследования (более 30 шт.) были отобраны из карьера Восточной зоны в 2006 и 2019 гг. Состав турмалина изучен в 5 образцах из различных жил, включая кварц-турмалиновые агрегаты с различным соотношением основных минералов и фрагменты турмалинового «войлока» из полостей жилы. Состав зон и секторов роста определен для четырех кристаллов из разных образцов, также получены анализы для отдельных кристаллов.

Состав турмалина и сопутствующих минералов изучен в полированных препаратах при помощи растрового электронного микроскопа Tescan Vega 3 sbu с энерго-дисперсионным спектрометром (ЭДС) Oxford Instruments X-act (аналитик М.А. Рассомахин, ускоряющее напряжение 20 кВ, «живое» время 120 с, эталоны МАС (Micro-analysis consultants LTD, рег. № 1362) и MINM25-53, (Astimex Scientific Limited, серийный номер 01-044).). Все железо в анализах турмалина пересчитано как Fe_2O_3 для достижения реалистичных расчетных сумм. Формулы рассчитаны на 15 катионов, занимающих позиции

Y , Z и T ; содержания V_2O_5 и H_2O – по стехиометрии с учетом электронейтральности формулы.

Диагностика минералов (турмалин, смеси гипергенных минералов) была подтверждена методом рентгенофазового анализа на дифрактометре Shimadzu XRD-6000, Cu-K α излучение с графитовым монохроматором, скорость съемки 1°/мин (аналитики П. В. Хворов, Е.Д. Зенович). Параметры элементарной ячейки (ПЭЯ) турмалина рассчитаны по порошковым дифрактограммам для трех проб турмалина (выделенного из кварца-волосатика, корки на кристалле кварца и «войлока»). ПЭЯ рассчитаны методом наименьших квадратов по 17 (первые две пробы) и 9 интенсивным отражениям, не перекрывающимся с кварцем и возможным примесям гипергенных оксидов марганца, в диапазоне 6–1.5 Å. В качестве внутреннего эталона использован кварц. Содержания цветных металлов оценены при помощи портативного рентгенофлуоресцентного анализатора INNOV-X, аналитик Е.Д. Зенович. Все работы выполнены в ЦКП при ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН (Миасс). Для рентгенофазового и рентгенофлуоресцентного анализа использованы дубликаты проб, для которых получен состав турмалина.

Геологическая позиция

Месторождение золота Муртыкты расположено в 13–15 км от г. Учалы Республики Башкортостан, между деревнями Сафарово, Мансурово и Ильинка, в 20 км от гигантского Учалинского медноколчеданного месторождения. Месторождение расположено в северной части Восточно-Магнитогорской палеоостровной дуги среди вулканогенно-осадочных пород карамалыташской свиты D₂ef-zv в непосредственной близости к Шартымскому разлому. Геологическая структура месторождения в целом соответствует направлению Главного Уральского разлома (Знаменский, 1992; Сазонов и др., 1999). Простираение пород северо-восточное под углами 5–20°. Направление расланцевания изменяется от (аз. пад.) 100 до 280–290 при углах 70–85°. Месторождение сложено измененными вулканитами базальтового, андезитобазальтового состава и их туфами, кремнистыми пелитолитами, вулканомиктовыми песчаниками и алевропелитами (рис. 1). Преобразования выражены в серицитизации, карбонатизации и хлоритизации пород, а также образовании наложенного пирита.

На месторождении выделено три рудные зоны – Восточная, Промежуточная и Западная. На мо-

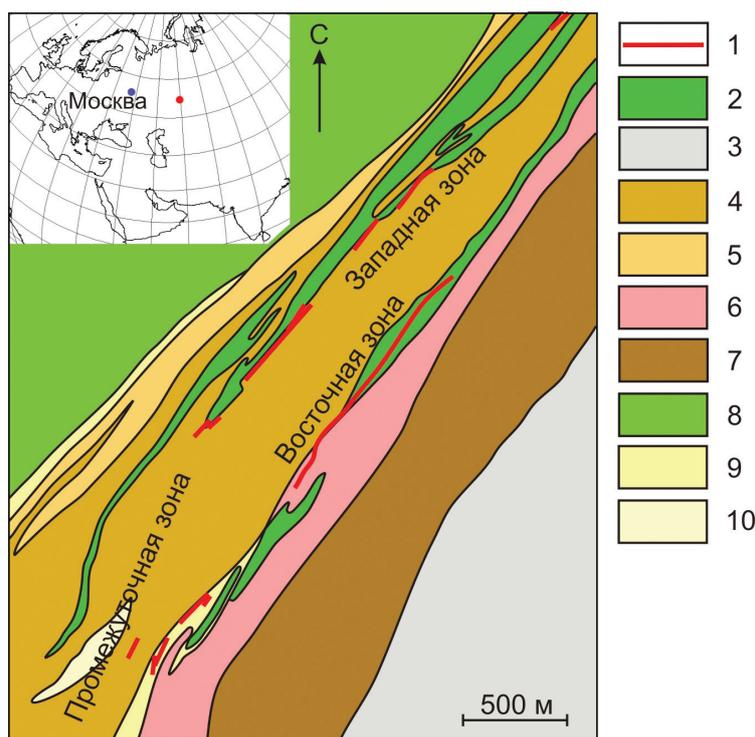


Рис. 1. Геологическая карта месторождения Муртыкты (по неопубликованным материалам В.В. Козлова, с упрощениями).

1 – жилые зоны; 2 – диабазы; 3 – туфобрекчии, туфопесчаники D_3fr ; 4 – туфопесчаники D_2e ; 5 – лавобрекчии D_2e ; 6 – кремнистые сланцы D_2e ; 7 – туфы, туфобрекчии D_2gv ; 8 – андезибазальты D_{1-2} ; 9 – карбонат-серицит-кварцевые породы; 10 – кварц-серицитовые породы.

Fig. 1. Geological map of the Murtykty deposit (simplified after unpublished materials of V.V. Kozlov).

1 – vein zones; 2 – diabases; 3 – Frasnian tuff breccias, tuff sandstones; 4 – Eifel tuff sandstones; 5 – Eifel lava breccias; 6 – Eifel siliceous schists; 7 – Givetian tuffs, tuff breccias; 8 – Early-Middle Devonian basaltic andesites; 9 – carbonate-sericite-quartz rocks; 10 – quartz-sericite rocks.

мент написания статьи на всех трех зонах были заложены отдельные карьеры, представляющие собой узкие, вытянутые согласно рудными телам и залеганию пород (азимут $\sim 20-40^\circ$) выработки. К месторождению Муртыкты также иногда относят участок Ик-Давлят, расположенный в 5 км к северу в той же геологической структуре. Золото на месторождении приурочено к метасоматически измененным породам, распределено неравномерно, без отчетливой связи с пиритовой минерализацией. Однако породы, обогащенные сульфидами полиметаллической ассоциации и теллуридами, содержат также повышенные количества Au и Ag (Падучина и др., 2019). В настоящее время месторождение Муртыкты обрабатывается открытым способом АО НПФ «Башкирская золотодобывающая компания».

Поздние кварцевые и кварц-карбонатные жилы наиболее широко распространены в Восточной зоне месторождения и, реже, в Западной и Промежуточной зонах. В Восточной зоне они образуют кулисообразные серии, секущие вулканогенно-оса-

дочные породы и выклинивающиеся на незначительной глубине (рис. 2) (Новоселов и др., 2008).

Мощность жил варьирует от первых сантиметров до 1 м, простирание, в целом, северо-западное, падение на северо-запад под углом $\sim 70^\circ$. В целом, для рудного поля поздние жилы характеризуются кварц-карбонатным составом, но отличаются по соотношению кварца и карбонатов и набору акцессорных минералов. Карбонаты встречаются в жилах всех зон, в то время как турмалин характерен только для Восточной зоны. Акцессорная минерализация распределена неравномерно как в масштабе месторождения, так и в жилах.

Минералогия поздних жил Восточной зоны

Основной минерал жил – *кварц*, образующий просвечивающие массы молочно-белого цвета. *Карбонаты* более характерны для жил восточной стенки карьера. Они, в основном, представлены одиночными ромбоэдрическими кристаллами и



Рис. 2. Борт карьера с серией кварцевых жил.
Высота уступа в среднем 5 м.

Fig. 2. A quarry wall with a series of quartz veins.
The height of the ledge is 5 m, on average.

их сростками, изолированно заключенными в кварце. Среди карбонатов преобладает *кальцит*, однако, встречаются также карбонаты ряда *доломит-анкерит*. В верхних горизонтах месторождения карбонаты в жилах практически были полностью разложены.

Спорадически в жилах восточной стенки современного карьера Восточной зоны встречаются участки прозрачного кварца и полости размером от первых до 40 см. Стенки полостей образованы кристаллами прозрачного кварца размером до 15 см с включениями синеватого турмалина. Кварц-волосатик нарастает на более ранний молочно-белый кварц и, иногда, образует на нем скипетровидные кристаллы. Содержание турмалина в «волосатике» составляет от первых процентов до его преобладания над кварцем. Полости могут быть заполнены войлокоподобным агрегатом, состоящим из игольчатого турмалина и гидроксидов Fe/Mn (рис. 3). Взаимоотношения турмалина и карбонатов неясны: нами не найдено ни одного образца с турмалином, содержащего свежий карбонат. Однако, турмалин в полостях часто покрыт железомарганцевыми охрами, образовавшимися в результате разложения карбонатов и иногда содержит включения таких охр.

В кварце жил встречены единичные включения *галенита*, *сфалерита*, *халькопирита*, *пирита*, *золота*, *рутила* и *ксенотима*. Размер выделений халькопирита в кварцевых жилах западной стенки карьера в 2006 г. достигал 2–3 см. Размер выделений других сульфидов имеют размер 20–50 мкм, золото – до 20 мкм (рис. 4).

Состав халькопирита и галенита соответствуют стехиометрической формуле. Пирит обогащен As (S 48.52, Fe 45.15, As 6.2, сумма 99.87, мас. %), при этом в лимоните, образовавшемся по пириту, содержание As значительно ниже (~1 мас. % As_2O_5). В сфалерите ЭД спектры фиксируют незначительную примесь Fe. Золото высокопробное, содержание Ag в нем колеблется в пределах первых процентов.

Рутил встречается в кварце в виде включений размером менее 20 мкм. Он также обнаружен в плоскости («зеркале») скольжения в кварце в виде сплошной массы, состоящей из параллельно-шестоватого агрегата тончайших иголочек (рис. 5). Рутил содержит примесь V (TiO_2 97.44, V_2O_5 2.05, сумма 99.49 мас. %).

В одной из жил, отличающейся большим содержанием неизменного карбоната, обнаружены парагенетические сростания турмалина с кальцитом и ксенотимом-(Y) (рис. 6). Состав ксенотима (мас. %): P_2O_5 34.55, CaO 0.19, Y_2O_3 39.67, Nd_2O_3 1.47, Sm_2O_3 2.34, Eu_2O_3 2.49, Gd_2O_3 9.20, Dy_2O_3 4.50, Er_2O_3 2.91, Yb_2O_3 3.33, сумма 100.65.

Гипергенные преобразования жил сводятся к разложению Mn- и Fe-содержащих карбонатов (кальцита, доломита) с образованием железистых и марганцевых охр, часто развитых по трещинам спайности с образованием «ящичных» структур (рис. 7а), замещению халькопирита оксидами и малахитом, пирита – гетитом и лимонитовыми охрами.

На кристаллы кварца в пустотах нарастают черные почковидные агрегаты с плотной внеш-

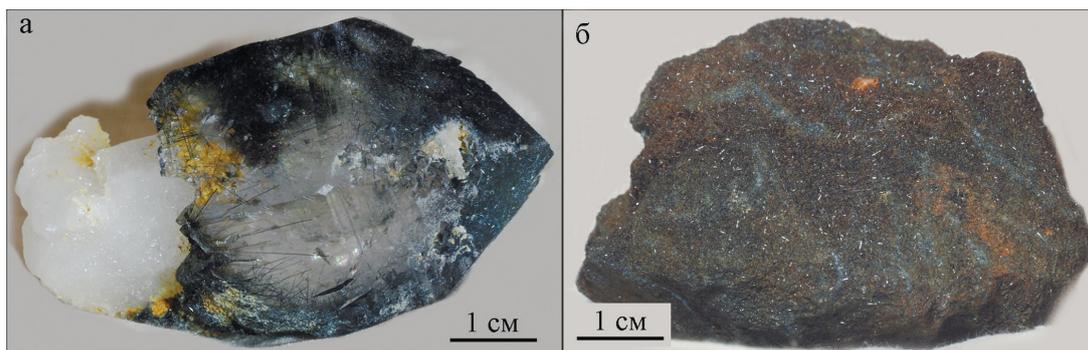


Рис. 3. Формы выделения турмалина из кварцевых жил месторождения Муртыкты.

а – скипетровидный кристалл кварца с включениями игл турмалина; б – войлокоподобный агрегат турмалина из полости кварцевой жилы.

Fig. 3. Morphology of tourmaline in quartz veins of the Murtykty deposit.

а – scepter quartz crystal with inclusions of acicular tourmaline; б – felt-like tourmaline aggregate from the cavity of the quartz vein.

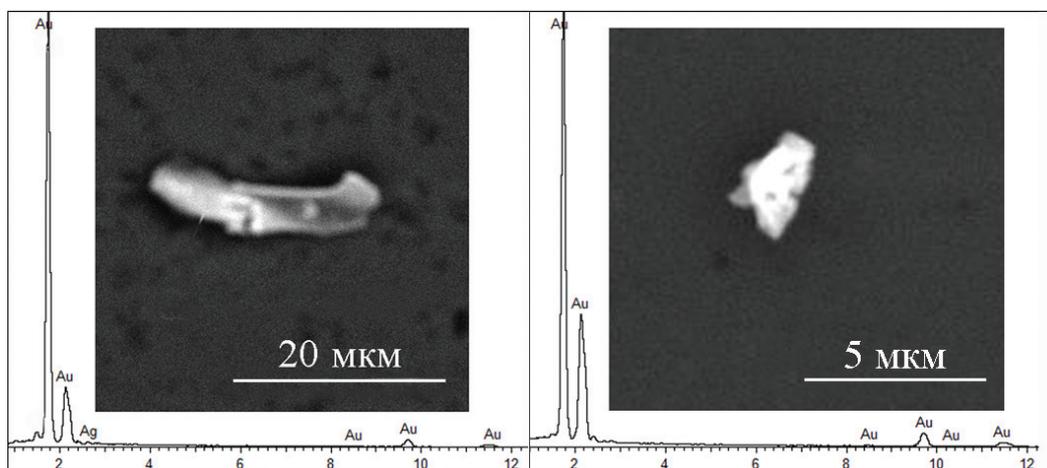


Рис. 4. Включения золота в кварце из жил месторождения Муртыкты.

BSE фото и энергодисперсионные спектры.

Fig. 4. Gold inclusions in quartz from veins of the Murtykty deposit.

BSE photo and ED spectra.

ней коркой. В разрезе почек вскрывается ажурный агрегат глинистого минерала с просечками безжелезистого гидроксида марганца с примесями Cu и Zn и «сгустками» Pb-Zn-Ba-содержащего гидроксида марганца (рис. 7б). Рентгенограмма вещества близка к рентгенограмме минералов группы криптомелана (халькофанит, PDF 45-1320) с примесью псиломелана (табл. XL, Frenzel., 1980). Ячеистое строение агрегата обусловило его очень низкую плотность – отдельные образцы плавают в воде.

Иногда войлокоподобный турмалин содержит включения белого мучнистого вещества, рентгенограмма которого соответствует каолиниту с очень низкой упорядоченностью.

Турмалин образует полупрозрачные игольчатые кристаллы длиной от 2–3 мм до 3 см и толщиной от 0.05 до 0.5 мм. Макроскопически минерал

имеет стально-серый до серовато-голубого, почти черного цвет. Дихроизм макроскопически проявлен слабо. Под микроскопом цвет минерала сероголубой по Ng и бесцветный по Np, участками в турмалине развиты пятна ожелезнения, иногда включения охристого материала наблюдаются непосредственно в кристалле. Головки кристаллов иногда расщепленные, параллельно-шестоватые, «шерстяные». Оптически минерал аномально двуосный с небольшим углом оптических осей, удлинение отрицательное, угасание прямое. Показатели преломления $n_g = 1.648$ $n_p = 1.630$, двупреломление 0.018.

Состав турмалина колеблется как в пределах одного образца, так и в образцах, отобранных из различных участков карьера и представленных агрегатами разной морфологии. В поперечном се-

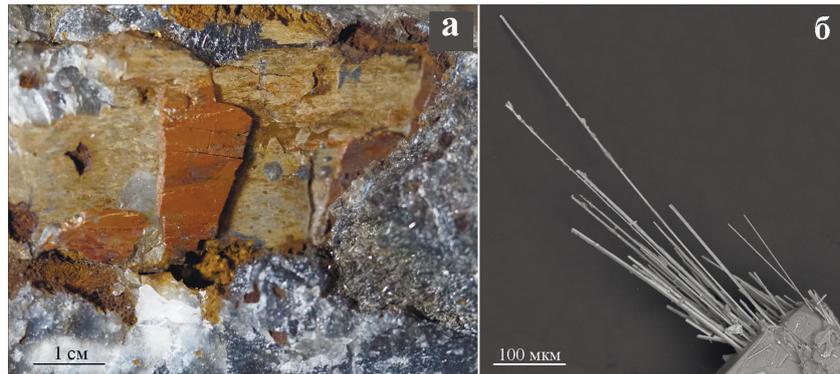


Рис. 5. Рутил из кварцевых жил месторождения Муртыкты.

а – массивный агрегат рутила в кварце с включениями турмалина; б – BSE-фото пучка иголок рутила из краевой части массивного агрегата.

Fig. 5. Rutile from quartz veins of the Murtykty deposit.

а – massive aggregate of rutile in quartz with tourmaline inclusions; б – BSE photo of an radial intergrowth of acicular rutile in the marginal part of massive aggregate.

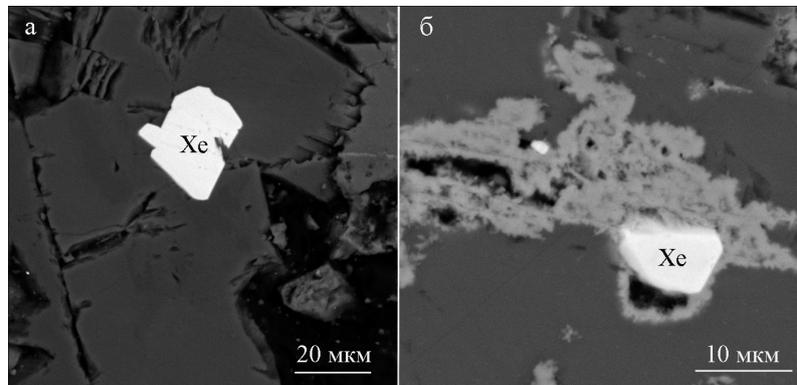


Рис. 6. Кристаллы ксенотима-(Y).

а – в турмалине; б – на границе карбоната с лимонитом. BSE фото.

Fig. 6. Xenotime-(Y) crystals.

а – in tourmaline; б – at the boundary of carbonate with limonite. BSE photo.

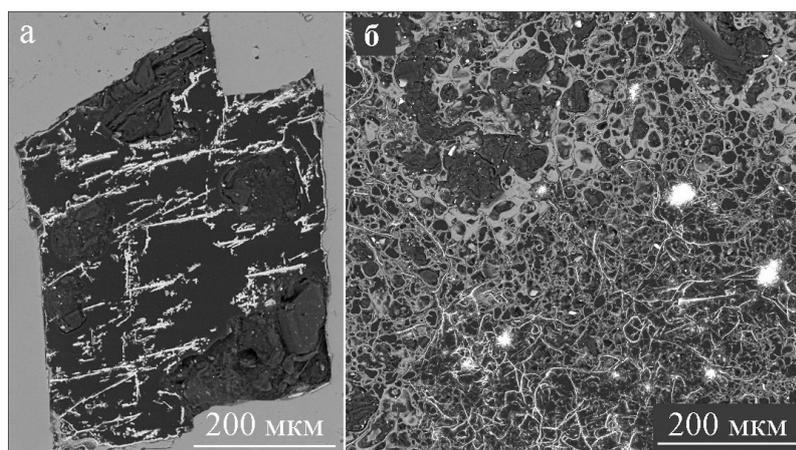


Рис. 7. Гипергенные минералы в кварцевых жилах месторождения Муртыкты.

а – ящичная структура лимонита в полностью разложившемся карбонате; б – агрегат гидроксидов Mn и глинистых минералов. BSE фото.

Fig. 7. Supergeny minerals in quartz veins of the Murtykty deposit.

а – box structure of limonite in decomposed carbonate; б – aggregate of Mn hydroxides and clay minerals. BSE photo.

чении проявлена зональность и секториальность, обусловленная колебаниями содержаний натрия, железа и магния (рис. 8, табл.). Магнезиальность изученных турмалинов $\#Mg = Mg/(Mg + Fe)$ варьирует в пределах 0.6–0.8. В некоторых зонах кристаллов установлены незначительные примеси титана и ванадия.

Суммы анализов, при условии отнесения всего железа к Fe^{2+} и расчета содержаний H_2O и B_2O_3 по стехиометрии, превышают 100 %, что связано, по-видимому, с принадлежностью турмалинов к оксиразновидностям с замещением $O^{2-} \Rightarrow (OH)$. Действительно, пересчет содержаний железа на Fe_2O_3 и расчет содержания H_2O с учетом замещения $OH \Rightarrow O^{2-}$ приводит к получению более реалистичных сумм (табл.). Известно, что определение состава турмалина микрорентгеноспектральными методами сопряжено с методическими трудностями (McGee, Anovitz, 1996). Тем не менее, поскольку анализы в данной работе получены в одинаковых условиях на одном приборе с использованием одинаковых эталонов, мы считаем возможным использовать их для оценки тенденций изменения состава турмалина.

По количеству вакансий и Al в позициях X и Y выделяется 2 группы анализов, образующие разграниченные поля, попадающие на диаграмме составов в области оксидравита и магнезиофойтита/оксимагнезиофойтита (рис. 9). Анализы, попадающие в разные поля, характеризуют не только разные образцы, но даже разные зоны и сектора в пределах одного кристалла (красные точки на рис. 9), при этом в области оксидравита наблюдается тен-

денция увеличения количества вакансий с уменьшением магнезиальности турмалина. Колебания состава вдоль удлинения не превышают колебаний в различных зонах поперечного сечения.

Рентгенофлюоресцентным анализом установлено присутствие в турмалинах цинка до 0.15 мас. %.

Дифрактограммы образцов турмалина, отобранных из включений в кварце, корок на нем и «ваты» близки между собой и сходны с дифрактограммой дравита (PDF 21-0164). Частные отражения широкие, часто несимметричные, что согласуется с неоднородным составом минерала. ПЭЯ колеблются $a_0 = 15.92 - 15.93$, $c_0 = 7.18 - 7.22$ Å. В связи с тем, что ПЭЯ получены по порошковой дифрактограмме, корректно выявить зависимость между составом турмалина и ПЭЯ на данном этапе невозможно. Несколько уменьшенная величина a_0 , по сравнению с дравитом (15.96(2), www.mindat.org), согласуются с замещением более мелким катионом Al^{3+} более крупных Mg^{2+} и Fe^{3+} в позиции Y.

Обсуждение и выводы

Условия образования

Поздние карбонат-кварцевые жилы в пределах месторождения Муртыкты распространены закономерно. В Промежуточной зоне обохранные кварцевые жилы мощностью до нескольких сантиметров отмечались на верхних горизонтах в северной части карьера в 2000-е гг., но турмалин и рудная минерализация в них не были выявле-

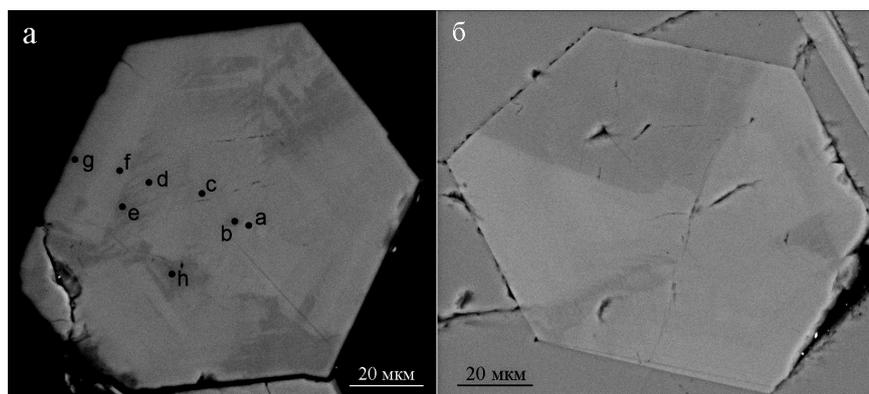


Рис. 8. Зонально-секториальный (а) и секториальный (б) кристаллы турмалина месторождения Муртыкты. BSE фото. Анализы точек а–h см. табл.

Fig. 8. Zonal-sectorial (a) and sectorial (б) tourmaline crystals of the Murtykty deposit. BSE photo. For analyses of points a–h, see Table.

Таблица
TableХимический состав турмалина месторождения Муртыкты
Chemical composition of tourmaline of the Murtykty deposit

№	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	V ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃ *	мас. %										Коэффициенты в формуле, $\sum_{\text{катионов}} Y_{i-Z} \cdot r_i = 15$					
						MgO	Na ₂ O	B ₂ O ₃ **	H ₂ O**	Сумма	Na	Mg	Al	Fe ³⁺	Ti	V	Si	O	OH		
1	37.63	0.45	34.56	-	7.11	6.57	2.22	10.87	2.64	102.05	0.69	1.57	6.51	0.86	0.05	0.00	6.01	1.19	2.81		
2	38.04	-	36.83	0.16	4.95	7.00	2.66	11.27	2.86	103.77	0.80	1.61	6.70	0.57	0.00	0.25	5.87	1.05	2.95		
3	38.03	0.20	35.75	-	5.78	6.82	2.52	10.99	2.65	102.74	0.77	1.61	6.66	0.69	0.02	0.00	6.02	1.20	2.80		
4	37.31	-	35.57	-	6.04	6.58	2.70	10.84	2.58	101.62	0.84	1.57	6.72	0.73	0.00	0.00	5.98	1.25	2.75		
5	38.06	-	37.51	-	3.84	7.05	2.96	11.08	2.66	103.16	0.90	1.65	6.93	0.45	0.00	0.00	5.97	1.22	2.78		
6	37.64	-	34.74	-	6.56	6.48	2.58	10.80	2.51	101.30	0.81	1.55	6.59	0.79	0.00	0.00	6.06	1.31	2.69		
7	36.73	-	34.23	0.33	6.15	6.59	2.58	10.99	2.80	100.41	0.79	1.55	6.38	0.73	0.00	0.53	5.81	1.04	2.96		
8	38.58	-	38.35	-	3.39	7.10	3.05	11.23	2.67	104.36	0.92	1.64	7.00	0.39	0.00	0.00	5.97	1.25	2.75		
9	39.09	-	35.58	-	5.72	7.55	1.48	11.19	3.12	103.73	0.45	1.75	6.51	0.67	0.00	0.00	6.07	0.77	3.23		
10	38.55	-	34.86	-	6.19	7.44	2.46	11.05	2.80	103.35	0.75	1.74	6.46	0.73	0.00	0.00	6.06	1.07	2.93		
11	39.24	-	37.75	-	4	7.36	3.18	11.32	2.65	105.50	0.95	1.68	6.83	0.46	0.00	0.00	6.02	1.29	2.71		
12	38.93	-	35.51	-	6.49	7.27	2.44	11.18	2.80	104.62	0.74	1.68	6.51	0.76	0.00	0.00	6.05	1.10	2.90		
13	39.07	-	35.10	-	6.2	7.65	2.67	11.18	2.79	104.67	0.80	1.77	6.43	0.73	0.00	0.00	6.07	1.10	2.90		
14	38.79	-	34.68	-	6.7	7.32	2.25	11.08	2.81	103.63	0.68	1.71	6.41	0.79	0.00	0.00	6.08	1.06	2.94		
15	38.13	-	34.31	-	5.71	7.38	2.39	10.88	2.74	101.54	0.74	1.76	6.46	0.69	0.00	0.00	6.09	1.08	2.92		
16	38.24	-	33.94	-	6.52	7.42	2.32	10.92	2.78	102.14	0.72	1.76	6.37	0.78	0.00	0.00	6.09	1.04	2.96		
17	37.91	-	33.62	-	6.34	7.43	2.43	10.82	2.74	101.29	0.76	1.78	6.37	0.77	0.00	0.00	6.09	1.07	2.93		
18	37.66	-	33.47	0.20	7.22	6.93	2.28	11.00	2.83	101.59	0.70	1.63	6.23	0.86	0.00	0.32	5.95	1.02	2.98		
19	38.67	-	37.72	-	3.94	7.01	3.18	11.19	2.56	104.27	0.96	1.62	6.91	0.46	0.00	0.00	6.01	1.34	2.66		
20	38.13	-	37.69	-	3.82	6.98	3.26	11.10	2.56	103.54	0.99	1.63	6.95	0.45	0.00	0.00	5.97	1.33	2.67		
21	38.87	-	37.69	-	3.88	7.08	3.13	11.21	2.58	104.44	0.94	1.64	6.89	0.45	0.00	0.00	6.03	1.33	2.67		
22	38.85	-	37.15	-	4.76	7.01	3.22	11.20	2.54	104.73	0.97	1.62	6.79	0.56	0.00	0.00	6.03	1.38	2.62		
23	38.17	-	34.63	-	6.16	7.29	2.42	10.95	2.76	102.38	0.74	1.73	6.48	0.74	0.00	0.00	6.06	1.08	2.92		
24	37.97	-	33.86	-	6.63	7.08	2.28	10.82	2.70	101.34	0.71	1.69	6.41	0.80	0.00	0.00	6.10	1.11	2.89		
25	39.36	-	38.21	-	4.77	7.06	2.92	11.41	2.71	106.44	0.86	1.60	6.86	0.55	0.00	0.00	5.99	1.25	2.75		
26	38.86	0.57	36.13	-	7.09	6.86	2.55	11.29	2.69	106.04	0.76	1.57	6.56	0.82	0.07	0.00	5.98	1.24	2.76		
27	39.51	0.20	36.97	-	6.07	7.04	3.00	11.39	2.62	106.79	0.89	1.60	6.65	0.70	0.02	0.00	6.03	1.34	2.66		
28	39.36	-	36.78	-	6.36	7.22	2.90	11.38	2.73	106.73	0.86	1.64	6.62	0.73	0.00	0.00	6.01	1.22	2.78		
29	38.53	-	38.63	-	3.9	7.01	3.18	11.29	2.66	105.20	0.95	1.61	7.01	0.45	0.00	0.00	5.93	1.27	2.73		
30	38.58	0.04	34.45	-	6.39	7.17	2.38	10.97	2.70	102.68	0.73	1.69	6.43	0.76	0.00	0.00	6.11	1.15	2.85		
31	38.91	-	36.80	-	5.32	7.12	2.80	11.23	2.69	104.87	0.84	1.64	6.71	0.62	0.00	0.00	6.02	1.22	2.78		
32	37.61	-	34.71	-	6.26	6.87	2.10	10.83	2.76	101.14	0.65	1.64	6.57	0.76	0.00	0.00	6.04	1.05	2.95		

Окончание таблицы

№	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	V ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃ *	MgO	Na ₂ O	B ₂ O ₃ **	H ₂ O**	Сумма	Na	Mg	Al	Fe ³⁺	Ti	V	Si	O	ОН
мас. %																			
33	37.81	-	34.33	-	6.33	7.15	2.43	10.86	2.72	101.62	0.75	1.71	6.48	0.76	0.00	0.00	6.05	1.10	2.90
34	38.44	-	37.54	-	3.88	6.88	2.84	11.11	2.61	103.30	0.86	1.60	6.92	0.46	0.00	0.00	6.01	1.27	2.73
35	38.07	-	34.93	-	6.28	6.73	2.69	10.89	2.53	102.12	0.83	1.60	6.57	0.75	0.00	0.00	6.07	1.31	2.69
36	38.42	-	35.54	-	6.08	7.28	1.58	11.09	3.06	103.06	0.48	1.70	6.56	0.72	0.00	0.00	6.02	0.80	3.20
37	38.66	-	35.47	-	5.98	7.27	1.66	11.10	3.01	103.15	0.50	1.70	6.55	0.70	0.00	0.00	6.05	0.86	3.14
38	38.83	-	35.38	-	6.09	7.29	1.67	11.12	3.00	103.38	0.51	1.70	6.52	0.72	0.00	0.00	6.07	0.88	3.12
39	39.46	-	35.53	-	5.94	7.39	1.37	11.22	3.08	103.99	0.41	1.71	6.49	0.69	0.00	0.00	6.11	0.82	3.18
40	38.25	0.51	34.81	-	7.36	6.78	2.29	11.04	2.68	103.72	0.70	1.59	6.46	0.87	0.06	0.00	6.02	1.19	2.81
41	39.14	-	35.98	-	5.75	7.36	1.72	11.22	3.02	104.19	0.52	1.70	6.57	0.67	0.00	0.00	6.06	0.88	3.12
42	38.96	-	35.32	-	5.83	7.34	1.65	11.11	2.99	103.20	0.50	1.71	6.51	0.69	0.00	0.00	6.09	0.88	3.12
43	37.53	-	34.62	-	6.42	6.99	1.57	10.84	2.96	100.94	0.49	1.67	6.54	0.77	0.00	0.00	6.02	0.83	3.17
44	37.56	-	34.26	-	5.88	7.26	1.47	10.80	3.02	100.24	0.46	1.74	6.50	0.71	0.00	0.00	6.05	0.76	3.24
45	37.65	-	36.37	-	4.6	6.95	2.94	10.93	2.60	102.04	0.91	1.65	6.82	0.55	0.00	0.00	5.99	1.25	2.75

Примечание. Анализы 1–8, 9–15, 16–25 и 26–30 выполнены для четырех различных кристаллов турмалина, 1–8 соответствуют точкам а–h на рис. 8а, соответственно; * – все железо рассчитано как Fe³⁺, ** – V₂O₅ и H₂O рассчитано по стехиометрии, прочерк – ниже предела обнаружения.

Note. Analysis 1–8, 9–15, 16–25 and 26–30 made for four different tourmaline crystals, 1–8 correspond to points a–h at fig. 8a, respectively; * – all iron is recalculated as Fe³⁺, ** – V₂O₅ and H₂O are recalculated after stoichiometry; dash – below detection limit.

ны. Спорадически секущие неминерализованные кварцевые и кварц-карбонатные жилы встречались в карьере Западной Зоны, но в них также не был отмечен турмалин. Нужно отметить, что, по свидетельству ведущего специалиста НПФ БЗК И.Б. Фадиной, такие карбонат-кварцевые жилы, в целом, не содержали промышленных концентраций Au. Однако на месторождении Ик-Давлят в секущих сланцеватость сантиметровых кварцевых жилах с промышленными концентрациями Au турмалин отсутствовал (Белогуб и др., 2006). Таким образом, в пределах собственно месторождения Муртыкты турмалин встречается только на ограниченном участке, а секущие сланцеватость существенно кварцевые жилы имеют либо неодинаковую природу, либо являются следствием зональности в пределах зоны развития поздних секущих жил.

Температура образования поздних жил с халькопиритом в Восточной зоне месторождения по данным изучения двух и трехфазных флюидных включений в кварце составила 180–200°. Температура эвтектики соответствует солевой системе Na₂SO₄–K₂SO₄–CO₂–H₂O и солености около 4.0–4.7 мас. % NaCl-экв., давление оценивается в 500 кбар. Поздние кварцевые жилы Восточной зоны формировались при несколько более низких температурах, чем сходные кварц-карбонатные жилы Промежуточной и Западной зон (Семибратова, Юминов, 2007).

В.Н. Сазонов (1998) предполагал полигенный и полихронный характер формирования месторождения Муртыкты. Начальный этап связывался с вулканогенно-осадочным процессом, последующие – с метасоматозом березитовой формации, обусловленным влиянием интрузивного магматизма, при этом температуры начала метасоматического рудообразования оценены как 410–360 °С, окончания – менее 200 °С. Таким образом, температура формирования изученных жил попадает в «рудный» температурный интервал, а турмалин может нести типоморфные признаки, указывающие на источник вещества, по крайней мере, завершающих этапов рудообразования.

Типоморфизм турмалина

Турмалины месторождения Муртыкты по составу попадают в поле оксидравит-оксимагнезиофойтит (рис. 9), а по предполагаемому абсолютному преобладанию железа в окисной

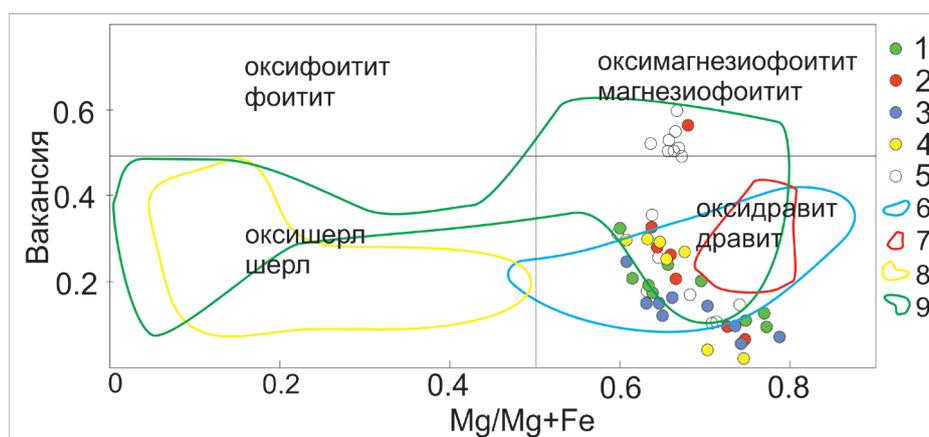


Рис. 9. Состав турмалина из кварцевых жил месторождения Муртыкты (1–5) по сравнению с составами турмалина из месторождений различного генезиса (6–9).

1 – точки составов (таблица); 2–4 – различные зоны и секторы отдельных кристаллов; 5 – образцы из разных жил. Поля составов турмалина из месторождений: 6 – Cu-Mo-Au-Te порфиривого Факос, Греция (Voudouris et al., 2019); 7 – орогенного золота Хатти, Индия (Hazarika, Mishra, 2015); 8, 9 – оловорудного Хнилец, Словакия (Jiang et al., 2008): 8 – гранитов; 9 – вмещающих метаморфических пород.

Fig. 9. Composition of tourmaline from quartz veins of the Murtykty deposit (1–5) compared with compositions of tourmaline from various deposits (6–9).

1 – points of composition (Table); 2–4 – various zones and sectors of individual crystals; 5 – samples from different veins. Compositional fields of tourmaline from deposits: 6 – Fakos Cu-Mo-Au-Te porphyry, Greece (Voudouris et al., 2019); 7 – Hatti orogenic gold, India (Hazarika, Mishra, 2015); 8, 9 – Hnilec tin, Slovakia (Jiang et al., 2008): 8 – granites; 9 – host metamorphic rocks.

форме могут быть отнесены к ряду оксимагнезиофойтит–бозитит. Они достаточно высокомагнезиальные и не содержат типичных для порфириковых месторождений примесей металлов и As (Baksheev et al., 2012), также как и типичных для гранитов примесей Mn и F (Кузьмин и др., 1979, London et al., 1996 и др.).

Состав изученных турмалинов близок к метаморфогенным дравитам и оксидравитам орогенных золоторудных месторождений (Hazarika, Mishra, 2015), поздним стадиям формирования оловорудного месторождения Хнилец, связанными с вовлечением в процесс метаморфогенных флюидов (Jiang et al., 2008) и турмалинов месторождения золота, которое рассматривается как переходное от порфиривого к эпитермальному (Voudouris et al., 2019). Сходство с типичными низкотемпературными метаморфогенными дравитами безрудных толщ состоит в присутствии магнезиофойтитового минала (Henry, Dutrow, 2012). Бозитит как новый минеральный вид был впервые описан на месторождении Дарасун в содержащих золото, пирит, арсенопирит и другие сульфиды карбонатно-кварцевых жилах, связанных с субвулканической гранодиорит-порфириковой интрузией (Ertl et al., 2016). Нужно отметить, что на этом месторождении бозитит – самый ранний из турмалинов, а более поздние

генерации представлены оксидравитом и дравитом, в то время, как в турмалинах месторождения Муртыкты тенденция уменьшения содержания железа в более поздних зонах не прослеживается.

Таким образом, минеральная ассоциация, геологические условия нахождения и состав турмалина не позволяют однозначно связать его с магматическим процессом.

Источник бора

Хотя минералы бора в области развития вулканогенно-осадочных комплексов Южного Урала часто образуют значительные скопления (например, мощные кварц-манганаксинитовые жилы на месторождениях марганца (Брусницын, 2013) или карбонатно-аксинитовые жилы в дайках диабазы из окрестностей г. Миасса (авторские данные)), источник В в них остается дискуссионным.

Для изученных кварцевых жил месторождения Муртыкты можно предположить два источника: бор мог быть перераспределен из захороненных океанических осадков во время коллизии и связанного с ней динамометаморфизма или поступать из В- и РЗЭ-содержащих гидротермальных растворов, связанных с массивами гранитоидов (Мансуровский, D₂, расположен в 6 км к западу от место-

рождения) или диоритов (Сангалыкский, D_2 , 5 км к северо-западу). Возможность образования минерализованных кварцевых жил на таком расстоянии от интрузивных массивов не вызывает сомнений, однако для самих массивов турмалин не характерен.

Перенос В из захороненных морских осадков и его минеральная фиксация при диагенезе показаны на примере обогащения В слоистых силикатов, выносимых с больших глубин грязевыми вулканами (Korf, Deyhle, 2002; Sokol et al., 2019). При метаморфизме и метасоматических преобразованиях океанических осадков, образовавшихся в условиях Магнитогорской палеоостровной дуги, могли формироваться содержащие бор флюиды, из которых образовался турмалин. В пользу этой гипотезы свидетельствует наличие борной минерализации на месторождениях марганца, расположенных в близкой геологической позиции на незначительном расстоянии от месторождения Муртыкты, на которых не зафиксировано влияние магматических массивов.

На основании имеющихся данных однозначно судить о генезисе рассмотренных жил преждевременно. Однако для месторождения Муртыкты нельзя исключать вероятность комплексного процесса, включающего преобразования боросодержащих осадков морского происхождения флюидом, связанным с магматическими массивами района.

Работа поддержана проектом фундаментальных научных исследований по программам РАН (№ АААА-А18-11060900540). Авторы благодарны руководству и сотрудникам НПФ БЗК за содействие в работе на карьерах месторождения Муртыкты и О.С. Верещагину за конструктивные замечания, позволившие значительно улучшить статью.

Литература

Бакшеев И.А., Плотинская О.Ю. (2011) Турмалин месторождений Биргильдинско-Томинского рудного узла. *Минералогия Урала-2011. Материалы VI Всероссийского совещания*. Миасс: ИМин УрО РАН, 129–133.

Барсанов Г.П. О изоморфном ряде аксинита и новом минеральном виде севергинита (1951) Труды Минералогического Музея, **3**, 10–18.

Белогуб Е.В., Новоселов К.А., Котляров В.А., Фаина И.Б. (2006) Минералогия окисленных руд золото-полиметаллического месторождения Ик-Давлят (Южный Урал). *Записки РМО*. **135**(5), 35–43.

Брусницын А.И. (2013) Минералогия марганцевоносных метасадков Южного Урала. СПб: СПбГУ, 160 с.

Знаменский С.Е. (1992) Структура и закономерности размещения золото-полиметаллического оруденения Ильинского рудного поля. Уфа, БФАН СССР, 80 с.

Кузьмин В.И., Добровольская Н.В., Солнцева Л.С. (1979) Турмалин и его использование при поисково-оценочных работах. М., Недра, 270 с.

Новоселов К.А., Белогуб Е.В. (2008) Восточная зона золото-сульфидного месторождения Муртыкты (материалы к путеводителю по Ильинскому рудному полю, Южный Урал). *Металлогения древних и современных океанов–2008. Рудоносные комплексы и рудные фацции*. Миасс: ИМин УрО РАН, 203–210.

Падучина Ю.А., Чухарева Н.С., Новоселов К.А., Паленова Е.Е., Белогуб Е.В., Блинов И.А., Артемьев Д.А., Рассомахин М.А. (2019) Минералогия благородных металлов месторождения золота Муртыкты, Южный Урал. *Минералогия*, **5**(2), 57–68.

Плетнев П.А. (1995а) Минералогия гондитов и метавулканитов пренит-пумпеллиитовой фацции Кожавского Мп месторождения, Южный Урал. *Уральская летняя минералогическая школа-95*. Екатеринбург: УГГГА, 58–60.

Плетнев П.А. (1995б) Минералогия гондитов и метавулканитов пренит-пумпеллиитовой фацции Учалинского колчеданного месторождения, Южный Урал. *Уральская летняя минералогическая школа-95*. Екатеринбург, УГГГА, 60–64.

Сазонов В.Н. (1998) Золотопродуктивные метасоматические формации подвижных поясов (геодинамические обстановки и РТХ-параметры образования, прогностическое значение). Екатеринбург, УГГГА, 181 с.

Сазонов В.Н., Огородников В.Н., Коротеев В.А., Поленов Ю.А. (1999) Месторождения золота Урала. Екатеринбург, УГГГА, 570 с.

Семибратова Е.В., Юминов А.М. (2007) Условия образования поздних золотоносных жил Ильинского рудного поля (Учалинский район) по данным термобарогеохимического анализа. *Металлогения древних и современных океанов–2007. Гидротермальные и гипергенные рудоносные системы*. Миасс: ИМин УрО РАН, 13–19.

Bakshiev I., Prokof'ev V.Y., Zaraisky G., Chitalin A., Yapaskurt V., Nikolaev Y., Tikhomirov P., Nagornaya E., Rogacheva L., Gorelikova N., Kononov O. (2012) Tourmaline as a prospecting guide for the porphyry style deposits. *European Journal of Mineralogy*, **24**, 957–979.

Deksissa D., Koeberl C. (2002) Geochemistry and petrography of gold-quartz-tourmaline veins of the Okote area, southern Ethiopia: implications for gold exploration. *Mineralogy and Petrology*, **75**, 101–122.

Dommanget A., Milesi J.P., Diallo M. (1993) The Loulo gold and tourmaline-bearing deposit. *Mineralium Deposita*, **28**, 253–263.

- Ertl A., Baksheev I.A., Giester G., Lengauer C.L., Prokofiev V.Yu., Zorina L.D.** (2016) Bosiite, $\text{NaFe}^{3+}_3(\text{Al}_4\text{Mg}_2)(\text{Si}_6\text{O}_{18})(\text{BO}_3)_3(\text{OH})_3\text{O}$, a new ferric member of the tourmaline supergroup from the Darasun gold deposit, Transbaikalia, Russia. *European Journal of Mineralogy*, **28**, 581–591.
- Frenzel G.** (1980) The manganese ore minerals. In: Varentsov I.M., Grasselly G.Y. (eds.) *Geology and geochemistry of manganese I*. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 25–157.
- Hazarika P., Mishra B.** (2015) Tourmaline as fluid source indicator in the late Archean Huttu orogenic gold deposit. In: *Mineral Resources in a Sustainable World*, Nancy, 465–467.
- Henry D., Guidotti Ch.** (1985) Tourmaline as a petrogenetic indicator mineral: an example from the staurolite-grade metapelites of NW Maine. *American Mineralogist*, **70**(1), 1–15.
- Henry D.J., Dutrow B.L.** (2012) Tourmaline at diagenetic to low-grade metamorphic condition: its petrologic applicability. *Lithos*, **154** 16–32.
- Henry D.J., Dutrow B.L.** (2018) Tourmaline studies through time: contributions to scientific advancements. *Journal of Geosciences*, **63**(2), 77–98.
- Henry D., Novák M., Hawthorne F.C., Ertl A., Dutrow B.L., Uher P., Pezzotta F.** (2011) Nomenclature of the tourmaline supergroup minerals. *American Mineralogist*, **96**, 895–913.
- Hinsberg V., Henry D., Marschall H.** (2011) Tourmaline: an ideal indicator of its host environment. *Canadian Mineralogist*, **49**(1), 1–16.
- Jiang S.-J., Radvanec M., Nakamura E., Palmer M., Kobayashi K., Zhao H.-X., Zhao K.-D.** (2008) Chemical and boron isotopic variations of tourmaline in the Hnilec granite-related hydrothermal system, Slovakia: Constraints on magmatic and metamorphic fluid evolution. *Lithos*, **106**(1–2), 1–11.
- Kopf A., Deyhle A.** (2002) Back to the roots: boron geochemistry of mud volcanoes and its implications for mobilization depth and global B cycling. *Chemical Geology*, **192**, 195–210.
- Koval P.V., Zorina L.D., Kitajev N.A., Spiridonov A.M., Ariunbileg S.** (1991) The use of tourmaline in geochemical prospecting for gold and copper mineralization. *Journal of Geochemical Exploration*, **40**(1–3), 349–360.
- London D., Morgan G., Wolf M.** (1996) Boron in granitic rocks and their contact aureoles. *Reviews in Mineralogy*, **33**, 299–330.
- McGee J., Anovitz L.** (1996) Electron probe microanalysis of geologic materials for boron. *Reviews in Mineralogy*, **33**, 771–788.
- Nekouvaght Tak M.A., Bazargani-Guilani K.** (2009) Chemical variation of tourmaline and source of hydrothermal solutions in Nezam Abad W-(Sn) ore deposit, Sanandaj-Sirjan zone, West-Central Iran. *Journal of Sciences*, **20**(2), 115–126.
- Pirajno F., Smithies R.H.** (1992) The FeO/(FeO + MgO) ratio of tourmaline: a useful indicator of spatial variations in granite-related hydrothermal mineral deposits. *Journal of Geochemical Exploration*, **42**(2–3), 371–381.
- Slack J.F., Trumbull R.B.** (2011) Tourmaline as a recorder of ore-forming processes. *Elements*, **7**(5), 321–326.
- Sokol E.V., Kokh S.N., Kozmenko O.A., Lavrushin V.Yu., Belogub E.V., Khvorov P.V., Kikvadze O.** (2019) Boron fate in an onshore mud volcanic environment: case study from the Kerch Peninsula, the Caucasus continental collision zone. *Chemical Geology*, **525**, 58–81.
- Vereshchagin O.S., Frank-Kamenetskaya O.V., Rozhdestvenskaya I.V., Zolotarev A.A.** (2018) Incorporation of 3d elements in tourmalines: structural adjustments and stability. *European Journal of Mineralogy*, **30**(5), 917–928.
- Voudouris P., Baksheev I.A., Mavrogonatos C., Spry P.G., Djiba A., Bismayer U., Papagkikas K., Katsara A.** (2019) Tourmaline from the Fakos porphyry-epithermal Cu-Mo-Au-Te prospect, Limnos island, Greece: mineral-chemistry and genetic implications. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, **7**, 329–330.
- Watenphul A., Burgröde M., Schluter J., Horn I., Malcherek T., Mihailova B.** (2016) Exploring the potential of Raman spectroscopy for crystallochemical analyses of complex hydrous silicates: II. Tourmalines. *American Mineralogist*, **101**, 970–985.

References

- Baksheev I.A., Plotinskaya O.Yu.** (2011) [Tourmaline of the deposits of the Birgilda-Tominsky ore cluster]. *Mineralogiya Urala-2011. Materialy VI Vserossiyskogo soveshchaniya [Mineralogy of the Urals-2011. Materials of the VI All-Russian Meeting]*. Miass, IMin UrO RAN, 129–133. (in Russian)
- Baksheev I., Prokof'ev V.Y., Zaraisky G., Chitalin A., Yapaskurt V., Nikolaev Y., Tikhomirov P., Nagornaya E., Rogacheva L., Gorelikova N., Kononov O.** (2012) Tourmaline as a prospecting guide for the porphyry style deposits. *European Journal of Mineralogy*, **24**, 957–979.
- Barsanov G.P.** (1951) About isomorphous series of axinite and severginite – the new mineral. *Trudy Mineralogicheskogo Muzeya [Proceedings of the Mineralogical Museum]*, **3**, 10–18.
- Belogub E.V., Novoselov K.A., Kotlyarov V.A., Fadina I.B.** (2006) [Mineralogy of oxidized ores of the Ik-Davlyat gold-polymetallic deposit (South Urals)]. *Zapiski RMO [Proceedings of the Russian Mineralogical Society]*, **135**(5), 35–43. (in Russian)
- Brunitsyn A.I.** (2013) [Mineralogy of manganese-bearing sedimentary rocks of the South Urals]. St. Petersburg, St. Petersburg State University, 160 p. (in Russian)

- Deksissa D., Koeberl C.** (2002) Geochemistry and petrography of gold-quartz-tourmaline veins of the Okote area, southern Ethiopia: implications for gold exploration. *Mineralogy and Petrology*, **75**, 101–122.
- Dommanget A., Milesi J.P. & Diallo M.** (1993) The Loulo gold and tourmaline-bearing deposit. *Mineralium Deposita*, **28**, 253–263.
- Ertl A., Baksheev I.A., Giester G., Lengauer C.L., Prokofiev V.Yu., Zorina L.D.** (2016) Bosiite, $\text{NaFe}^{3+}(\text{Al}_4\text{Mg}_2)(\text{Si}_6\text{O}_{18})(\text{BO}_3)_3(\text{OH})_3\text{O}$, a new ferric member of the tourmaline supergroup from the Darasun gold deposit, Transbaikalia, Russia. *European Journal of Mineralogy*, **28**, 581–591.
- Frenzel G.** (1980) The manganese ore minerals. In: Varentsov I.M., Grasselly G.Y. (eds.) *Geology and geochemistry of manganese I*. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 25–157.
- Hazarika P., Mishra B.** (2015) Tourmaline as fluid source indicator in the late Archean Hutti orogenic gold deposit. In: *Mineral Resources in a Sustainable World*, Nancy, 465–467.
- Henry D., Guidotti Ch.** (1985) Tourmaline as a petrogenetic indicator mineral: an example from the staurolite-grade metapelites of NW Maine. *American Mineralogist*, **70**(1), 1–15.
- Henry D.J., Dutrow B.L.** (2012) Tourmaline at diagenetic to low-grade metamorphic condition. *Lithos*, **154**, 16–32.
- Henry D.J., Dutrow B.L.** (2018) Tourmaline studies through time: contributions to scientific advancements. *Journal of Geosciences*, **63**(2), 77–98.
- Henry D., Novák M., Hawthorne F.C., Ertl A., Dutrow B.L., Uher P., Pezzotta F.** (2011) Nomenclature of the tourmaline supergroup minerals. *American Mineralogist*, **96**, 895–913.
- Hinsberg V., Henry D., Marschall H.** (2011) Tourmaline: an ideal indicator of its host environment. *Canadian Mineralogist*, **49**(1), 1–16.
- Jiang S.-J., Radvanec M., Nakamura E., Palmer M., Kobayashi K., Zhao H.-X., Zhao K.-D.** (2008) Chemical and boron isotopic variations of tourmaline in the Hnilec granite-related hydrothermal system, Slovakia: Constraints on magmatic and metamorphic fluid evolution. *Lithos*, **106**(1–2), 1–11.
- Kopf A., Deyhle A.** (2002) Back to the roots: boron geochemistry of mud volcanoes and its implications for mobilization depth and global B cycling. *Chemical Geology*, **192**, 195–210.
- Koval P.V., Zorina L.D., Kitajev N.A., Spiridonov A.M., Ariunbileg S.** (1991) The use of tourmaline in geochemical prospecting for gold and copper mineralization. *Journal of Geochemical Exploration*, **40**(1–3), 349–360.
- Kuz'min V.I., Dobrovolskaya N.V., Solntseva L.S.** (1979) [Tourmaline and its use in surveying works]. Moscow, Nedra, 270 p. (in Russian)
- London D., Morgan G., Wolf M.** (1996) Boron in granitic rocks and their contact aureoles. *Reviews in Mineralogy*, **33**, 299–330.
- McGee J., Anovitz L.** (1996) Electron probe microanalysis of geologic materials for boron. *Reviews in Mineralogy*, **33**, 771–788.
- Nekouvaht Tak M.A., Bazargani-Guilani K.** (2009) Chemical variation of tourmaline and source of hydrothermal solutions in Nezam Abad W-(Sn) ore deposit, Sanandaj-Sirjan zone, West-Central Iran. *Journal of Sciences*, **20**(2), 115–126.
- Novoselov K. A., Belogub E. V.** (2008) [Eastern zone of the Murtykty gold-sulfide deposit (materials for the guidebook to the Ilyinsky ore field, Southern Urals)]. *Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov–2008. Rudonosnye kompleksy i rudnye fatsii [Metallogeny of ancient and modern oceans–2008. Ore-bearing complexes and ore facies]*. Miass, IMin UrO RAN, 203–210. (in Russian)
- Paduchina Yu.A., Chukhareva N.S., Novoselov K.A., Palenova E.E., Belogub E.V., Blinov I.A., Artem'ev D.A., Rassomakhin M.A.** (2019) [Mineralogy of precious metals of the Murtykty gold deposit, South Urals]. *Mineralogiya [Mineralogy]*, **5**(2), 57–68. (in Russian)
- Pirajno F., Smithies R.H.** (1992) The FeO/(FeO + MgO) ratio of tourmaline: A useful indicator of spatial variations in granite-related hydrothermal mineral deposits. *Journal of Geochemical Exploration*, **42**(2–3), 371–381.
- Pletnev P.A.** (1995a) [Mineralogy of gondites and metavolcanic rocks of prehnite-pumpelleite facies of the Kozhaevo Mn deposit, South Urals]. *Ural'skaya letnyaya mineralogicheskaya shkola-95 [Ural Summer Mineralogical School-95]*. Yekaterinburg, UGGGA, 58–60. (in Russian)
- Pletnev P.A.** (1995b) [Mineralogy of gondites and metavolcanic rocks of prehnite-pumpelleite facies of the Uchaly massive sulfide deposits, South Urals]. *Ural'skaya letnyaya mineralogicheskaya shkola-95 [Ural Summer Mineralogical School-95]*. Yekaterinburg, UGGGA, 60–64.
- Sazonov V.N.** (1998) [Gold-bearing metasomatic complexes of mobile zones (geodynamic settings and PTX formation parameters and their prospects)]. Yekaterinburg, UGGGA, 181 p. (in Russian)
- Sazonov V.N., Ogorodnikov V.N., Koroteev V.A., Polenov Yu.A.** (1999) [Gold deposits of the Urals]. Yekaterinburg, UGGGA, 570 p. (in Russian)
- Semibratova E.V., Yuminov A.M.** (2007) [Formation conditions of late gold-bearing veins of the Ilyinsky ore field (Uchaly district) according to thermobarogeochemical analysis]. *Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov–2007. Gidrotermal'nye i gipergennyne rudonosnye systemy [Metallogeny of ancient and modern oceans–2007. Hydrothermal and supergene ore-bearing systems]*, Miass, IMin UrO RAN, 13–19. (in Russian)
- Slack J.F., Trumbull R.B.** (2011) Tourmaline as a recorder of ore-forming processes. *Elements*, **7**(5), 321–326.

Sokol E.V., Kokh S.N., Kozmenko O.A., Lavrushin V.Yu., Belogub E.V., Khvorov P.V., Kikvadze O. (2019) Boron fate in an onshore mud volcanic environment: case study from the Kerch Peninsula, the Caucasus continental collision zone. *Chemical Geology*, **525**, 58–81.

Vereshchagin O.S., Frank-Kamenetskaya O.V., Rozhdestvenskaya I.V., Zolotarev A.A. (2018) Incorporation of 3d elements in tourmalines: structural adjustments and stability. *European Journal of Mineralogy*, **30**(5), 917–928.

Voudouris P., Baksheev I.A., Mavrogonatos C., Spry P.G., Djiba A., Bismayer U., Papagkikas K., Katsara A. (2019) Tourmaline from the Fakos porphyry-epithermal Cu-Mo-Au-Te prospect, Limnos island, Greece: mineral-chemistry and genetic implications. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, **7**, 329–330.

Watenphul A., Burgrode M., Schluter J., Horn I., Malcherek T., Mihailova B. (2016) Exploring the potential of Raman spectroscopy for crystallochemical analyses of complex hydrous silicates: II. Tourmalines. *American Mineralogist*, **101**, 970–985.

Znamensky S.E. (1992) [Structure and location of gold-polymetallic mineralization of the Ilyinsky ore field]. Ufa, BFAN SSSR, 80 p. (in Russian).

Статья поступила в редакцию 25 марта 2020 г.