



ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ТУРМАЛИНА ИЗ МАГНЕЗИАЛЬНЫХ СКАРНОВ МЕСТОРОЖДЕНИЯ КУХИЛАЛ, ЮГО-ЗАПАДНЫЙ ПАМИР

А.К. ЛИТВИНЕНКО^{1,*}, Е.И. РОМАНОВА¹, О.А. ЯКУШИНА^{2,3}

¹ ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе»
23, ул. Миклухо-Маклая, г. Москва 117997, Россия

² ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М. Федоровского»
31, Старомонетный пер., г. Москва 119017, Россия

³ ФГБОУ ВО «Университет «Дубна»
19, ул. Университетская, г. Дубна, Московская область 141980, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Турмалин в магнезиальных скарнах Кухилала, несмотря на относительно хорошую изученность месторождения, ни разу не рассматривался в их составе [5, 6, 16]. Его разновидность, увит, упоминался в списке малораспространенных минералов с представлением только кристаллохимической формулы [17]. Л.Н. Шабынин, большой знаток скарнов, отмечал редкость турмалина в Mg-скарнах различных месторождений. Для турмалина из этого формационного типа характерна сильная вариация железистости и значительное содержание Са, при этом Са:Na варьирует от 2:3 до 20:1 [15]. По данным Н.Н. Перцева, также крупного специалиста по скарнам, турмалин является редким минералом Mg-скарновых месторождений [11]. Исключением служит относимое к скарновым борно-железородное месторождение Таежное, Алданский щит, где отмечено широкое развитие турмалина [12]. Турмалин (дравит) этого месторождения установлен только во вмещающих мраморы и Mg-скарны силикатных метаморфических породах.

Целью является определение парагенезисов, морфологии кристаллов, химического состава и генетических особенностей турмалина из Mg-скарнов Кухилала.

Объектом исследования являются крупные агрегаты (более 10 см в поперечнике) и кристаллы яблочно-зеленого турмалина в Mg-скарнах месторождения Кухилал.

Материалы и методы исследования. Образцы магнезиальных скарнов с турмалином были отобраны и задокументированы нами во время полевых работ на месторождении Кухилал в 2017 году. Для их изучения в камеральных условиях были применены минералогический, петрографический, рентгенофазовый, выполненный на ДРОН-ЗМ (аналитик А.В. Федоров, Российский геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе), микрозондовый, произведенный на Cameca SX 100 в режиме съемки 15 kV 30 nA (аналитик В.И. Таскаев, ИГЕМ РАН) и рентгенофлуоресцентный, на спектрометре AXIOS Advanced с рентгеновской трубкой, оснащенной Rh-анодом мощностью 3 kW и Philips PW-2400 с чувствительностью 10⁻⁴% (аналитик А.И. Якушев, ЦКП ИГЕМ РАН) анализы. Большинство исследований проводилось в лаборатории кафедры минералогии и геммологии Российского геологоразведочного университета им. Серго Орджоникидзе.

Результаты. Впервые изучен турмалин из магнезиальных скарнов месторождения Кухилал. Рассматриваемый минерал является редким для скарнов. Выделены две его минеральные ассоциации: первая — со шпинелью и форстеритом, вторая — с хлоритом и серпентином. По химическому составу турмалин отнесен к фторсодержащему увиту с близкой к нулевой железистостью. Он имеет чечевицеобразную форму с редко наблюдаемой, недоразвитой призмой. Рассмотрены его минералогические свойства, химический состав и условия образования. Турмалин может использоваться для изготовления недорогих ювелирных вставок.

Заключение. Установлено, что кристаллизация турмалина произошла в условиях гранулитовой фации регионального метаморфизма. Для образования бора для турмалина предположен апоосадочный, эвапоритовый источник.

Ключевые слова: Кухилал, Юго-Западный Памир, турмалин, увит, магнезиальные скарны, двухвершинные кристаллы без призмы, эвапориты, гранулитовая фация метаморфизма

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Для цитирования: Литвиненко А.К., Романова Е.И., Якушина О.А. Генетические особенности турмалина из магнезиальных скарнов месторождения Кухилал, Юго-Западный Памир. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2023;65(2):56—66. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2023-65-2-56-66>

Статья поступила в редакцию 30.04.2023

Принята к публикации 24.05.2023

Опубликована 25.05.2023

* Автор, ответственный за переписку

GENETIC FEATURES OF TOURMALINE FROM THE MAGNESIAN SKARNS OF KUHILAL DEPOSIT, SOUTHWESTERN PAMIR

ANDREY K. LITVINENKO^{1,*}, EKATERINA I. ROMANOVA¹, OLGA A. YAKUSHINA^{2,3}

¹ *Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting
23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia*

² *All-Russian Scientific-Research Institute of Mineral Resources named after N. M. Fedorovsky
31, Staromonetny lane, Moscow 119017, Russia*

³ *Dubna University
19, Universitetskaya str., Dubna, Moscow region 141980, Russia*

ABSTRACT

Background. Although the Kuhilal deposit of Mg skarns has been thoroughly studied, tourmaline in their composition has never been considered [5, 6, 16]. Uvite, a tourmaline variety, was mentioned in the list of rare minerals only with its crystallochemical formula [17]. L.N. Shabynin, a great connoisseur of skarns, noted the rarity of tourmaline in Mg skarns of various deposits. Tourmaline of this type is characterized by a strong variation in ferruginosity and a significant content of Ca. At the same time, Ca:Na varies from 2:3 to 20:1 [15]. According to N.N. Pertsev, another major specialist in skarns, tourmaline is a rare mineral of Mg skarn deposits [11]. The boron-iron ore deposit of Tayozhnoe, Aldan shield, is an exception. This deposit belongs to skarns, where a widespread development of tourmaline was noted [12]. Tourmaline (dravite) of this deposit was found only in silicate metamorphic rocks containing marbles and Mg skarns.

Aim. To determine the paragenesis, crystal morphology, chemical composition, and genetic characteristics of tourmaline from Kuhilal Mg skarns.

Materials and methods. Large aggregates (more than 10 cm across) and crystals of apple-green tourmaline from the Mg skarns of the Kuhilal deposit were investigated. Samples of Mg skarns containing tourmaline were collected and documented by the authors during fieldwork research at the Kuhilal deposit in 2017. The samples were examined by mineralogical and petrographic methods, X-ray diffraction analysis using a DRONE-3M (analyst A.V. Fedorov, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting), microprobe analysis using a Cameca SX 100 in 15 kV 30 nA shooting mode (analyst V.I. Taskaev, IGM RAS), and X-ray fluorescence analysis using an AXIOS advanced spectrometer with an X-ray tube equipped with a 3 kW Rh anode and Philips PW-2400 with a sensitivity of 10⁻⁴% (analyst A.I. Yakushev, IGM RAS). The majority of studies were conducted at the Department of Mineralogy and Gemology of the Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting.

Results. Tourmaline from the Mg skarns of the Kuhilal deposit has been studied for the first time. This mineral is rare for skarn rocks. Two tourmaline mineral associations were identified: with spinel and forsterite, and with chlorite and serpentine. In terms of chemical composition, tourmaline is

attributed to fluorine-containing uvite with a close to zero ferruginosity. Uvite is characterized by a lenticular shape with a rarely observed, underdeveloped prism. Its mineralogical properties, chemical composition, and formation conditions were analyzed. Tourmaline can be used to make inexpensive jewelry inserts.

Conclusion. Tourmaline crystallization occurred under the conditions of granulite facies of regional metamorphism. For boron formation, an apo-sedimentary, evaporite source is assumed.

Keywords: Kuhilal, Southwestern Pamir, tourmaline, uvite, magnesian skarns, two-vertex crystals without a prism, evaporites, granulite facies of metamorphism

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

Financial disclosure: no financial support was provided for this study.

For citation: Litvinenko A.K., Romanova E.I., Yakushina O.A. Genetic features of tourmaline from the magnesian skarns of Kuhilal deposit, Southwestern Pamir. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2023;65(2):56—66. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2023-65-2-56-66>

Manuscript received 30 April 2023

Accepted 24 May 2023

Published 25 May 2023

* Corresponding author

Геология месторождения Кухилал

Месторождение Кухилал было изучено и разведано советскими геологами в 50—80-х годах прошлого столетия. Оно специализировано на драгоценные камни: шпинель, клиногумит, а также на высокомагнезиальное сырье: форстерит, энстатит, тальк и магнезит. Кухилал находится на Юго-Западном Памире, который является фрагментом Нуристан-Памирского срединного массива в составе киммерийской Афгано-Южнопамирской складчатой области [8]. В строении Юго-Западного Памира выделено [1, 13] две позднеархейские (горанская и шахдаринская) и одна раннепротерозойская (аличурская) серии, а также разделяющий их мел-палеогеновый батолит памирско-шугнанских гранитоидов. Породы серий претерпели региональный полициклический метаморфизм в условиях гранулитовой, высокотемпературной амфиболитовой, эпидот-амфиболитовой и зеленосланцевой фаций [1, 8]. Месторождение локализовано в линзе магнезитовых мраморов, составляющих верхнюю часть разреза горанской серии [9]. Протяженность линзы достигает 1,2, мощность — более 0,5 км [2, 5]. Она залегает среди мигматитов и черных биотит-силлиманитовых гнейсов. В линзе магнезитов наблюдаются послойные тела пегматитов, аплитов и слабо измененных гнейсов (рис. 1). Месторождение Кухилал относится к магнезиально-скарновой формации [5] абиссальной фации [7]. По данным

[3], на месторождении Кухилал отсутствует единая метасоматическая зональность с участием гранитоидов, поэтому магнезиально-силикатные породы рассматриваются как гипермагнезиальные скарноиды, образовавшиеся между магнезитами и песчано-глинистыми осадками.

Термодинамические условия и эволюция минеральных ассоциаций месторождения коррелируются с P-T-параметрами, которые претерпел весь Юго-Западный Памир от ранних до поздних стадий своего развития [9].

Породообразующими минералами магнезиальных скарнов месторождения Кухилал являются магнезит, доломит, энстатит, форстерит, тальк, флогопит, клиногумит, шпинель и крупные скопления пирротина и пирита. Их особенность, несмотря на обилие сульфидов железа, проявлена в очень низкой железистости, от 0 до 1,6% [7]. Форстерит и шпинель частично (иногда полностью) замещены гидроталькитом, клинохлором, серпентином, бруситом и др., скопления которых называются магалами [7, 16].

Положение турмалина в магнезиальных скарнах

Крупные агрегаты турмалина были обнаружены в четвертом разведанном блоке, расположенном в контуре пятого участка, который отрабатывался на благородную шпинель и клиногумит в 2017 году (рис. 1). Турмалин встречен в составе двух минеральных ассоциаций: первая в парагенезисе

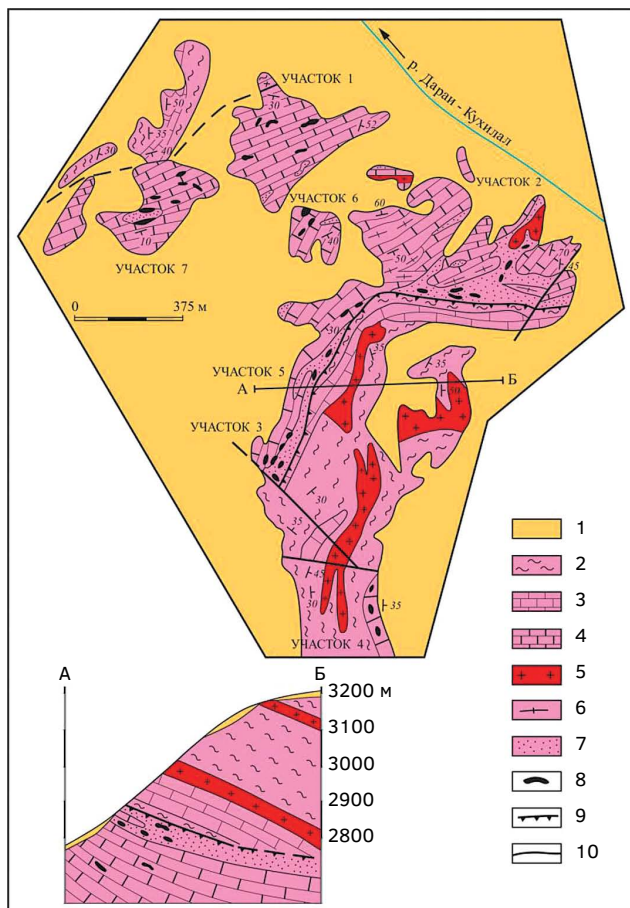


Рис. 1. Схематическая геологическая карта и разрез месторождения Кухилал по [2] с дополнениями и изменениями [9]: 1 — делювиальные отложения; 2 — силлиманитсодержащие гнейсы и мигматиты; 3—4 — мраморы: 3 — доломитовые, 4 — магнезитовые; 5 — пегматиты, аплиты; 6 — измененные гнейсы; 7—8 — магнезиальные скарны: 7 — энстатитовые с залежами талька и жецдрит-кианитовых пород; 8 — шпинель-форстеритовые; 9 — надвиг; 10 — разломы

Fig. 1. Schematic geological map and cross section of Kukulal deposit [2] with additions and changes [9]: 1 — deluvial deposits; 2 — gneiss and migmatite; 3, 4 — marbles; 3 — calcite; 4 — magnesite; 5 — granites, plagiogranites, pegmatites, aplite; 6 — altered gneiss; 7, 8 — skarn; 7 — enstatite with deposits gedrite and talc-kyanite rocks; 8 — spinel-forsterite; 9 — thrusts; 10 — faults

со шпинелью и форстеритом (рис. 2), а вторая — внутри белой (магнезит, доломит, флогопит, серпентин, хлорит, гиббсит, брусит), мягкой, но плотной массы (рис. 3).

В первой минеральной ассоциации турмалин представлен крупными яблочно-зелеными обособлениями до 10 см в поперечнике на фоне розовой



Рис. 2. Зеленые порфиробласты турмалина среди агрегата белого форстерита и розовой шпинели, в левой части пленки графита, длина штуфа 6,5 см
Fig. 2. Green porphyroblasts of tourmaline, surrounded by white forsterite and pink spinel, in the left side thin graphite aggregates, length — 6.5 cm



Рис. 3. Турмалин внутри серпентин-хлоритовой массы
Fig. 3. Serpentine-chlorite mass containing tourmaline

шпинели и белого форстерита. Хорошо сформированные кристаллы турмалина не обнаружены. Все минералы сильно трещиноваты (рис. 2). В контактах с турмалином на гранях шпинели наблюдается индукционная штриховка, свидетельствующая об одновременном росте этих минералов, а также о том, что турмалин обладал гранями. Эту ассоциацию можно рассматривать как первичную, магнезиально-скарновую, сформированную на прогрессивной стадии гранулитовой фации метаморфизма.

Во второй минеральной ассоциации (рис. 3) турмалин образует одиночные кристаллы от 2 до 20 мм в поперечнике (рис. 4) и друзы до 5×5×3 см (рис. 5). Эта минеральная ассоциация образует линзы длиной до 50 и мощностью 8—10 см. Эту ассоциацию мы рассматриваем как вторичную, послескарновую. В ней турмалин выделяется как реликтовый минерал. Турмалин



Рис. 4. Кристалл турмалина в белом агрегате, длина — 1,5 см

Fig. 4. Tourmaline crystal in white aggregate, length around 1.5 cm

этой ассоциации является главным объектом исследования.

Характеристика вмещающей породы и кристаллов турмалина

Одним из главных минералов ассоциации является хлорит. Он встречается в двух формах: однородной микрозернистой массы и в виде чешуйчатых кристаллов до 1 см, которые являются псевдоморфозами по флогопиту. Его реликты установлены рентгенофазовым анализом. Однородный хлорит образует агрегат молочно-белого цвета в тесных сростаниях с серпентином. Их поверхность бывает покрыта очень мелким рассеянным графитом. В серпентин-хлоритовую массу, содержащую реликты флогопита и форстерита. Важными второстепенными минералами этой ассоциации являются брусит и гиббсит, диагностированные в шлифах и рентгенофазовым анализом.

Турмалин имеет яркий яблочно-зеленый цвет. Показатели преломления: $n_o = 1,618—1,619$, $n_e = 1,640—1,642$; плотность 3,00 г/см³. Главные линии на рентгенограмме турмалина представлены следующими значениями: 6,420 (20), 5,009 (30), 4,619 (20), 4,244 (50), 3,999 (50), 3,501 (80), 2,976 (100), 2,632 (10), 2,586 (60), 2,502 (15), 2,385 (20), 2,126 (20), 2,048 (30), 1,925 (23). Данные значения близки к эталонным увита.

Размеры кристаллов варьируют от 0,1 до 15 мм в поперечнике. Кристаллы турмалина похожи



Рис. 5. Друза турмалина, кристаллы в серпентиновой оторочке, длина образца — 4 см

Fig. 5. Tourmaline druse, crystals covered with serpentine, length of sample around 4 cm

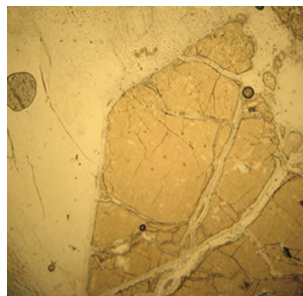
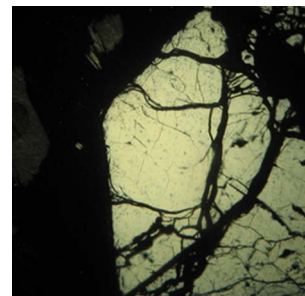


Рис. 6. Кристалл турмалина 2 мм длиной, в шлифе параллельно оси L_z , объектив $\times 5$

Fig. 6. Tourmaline crystal, 2 mm length, thin section performed parallel to L_z axis, magnifying $\times 5$



на чечевицу с двумя простыми формами: с одной стороны более развитая пирамида, с противоположной — слабовыпуклая. Пирамиды — асимметричны. Наиболее развитая грань пирамиды имеет символы $\{10\bar{1}1\}$, и слабо развита маленькая грань треугольной формы $\{02\bar{2}1\}$. Призма практически не сформирована, и наблюдается несимметричная, уплощенная дипирамида (рис. 4). В большинстве кристаллов призма отсутствует. Отношение длины кристалла к ширине составляет 1,5:15, 1:5.

Чечевицевидная форма кристаллов турмалина фиксируется в шлифах, изготовленных параллельно оси L_z (рис. 6). Плеохроизм турмалина проявляется от светло-бежевого до бежевого цвета, в скрещенных николях наблюдаются серые цвета интерференции. Одной из особенностей минерала является отсутствие газово-жидких включений. Твердые включения представлены розовым цирконом до 1,5 мм и чешуйками тунгстенита до 5 мм.

На поверхности серпентин-хлоритовой массы часто отмечаются слепки кристаллов турмалина после того, как они вывалились из породы. Вблизи поверхности слепка белая минеральная масса более плотная, как бы утрамбованная (рис. 7). Здесь же наблюдаются щелевидные пустотки размером $5 \times 0,5$ мм, выполненные бесцветными прозрачными длиннопризматическими уплощенными кристалликами арагонита (рис. 8). Пустотки часто находятся в агрегате брусита.

Турмалин в серпентин-хлоритовой массе всегда покрыт тонкой светло-серой пленкой серпентина до 1 мм толщиной (рис. 5). Многие кристаллы турмалина имеют ростовую зональность. Например, наблюдался кристалл размером 2,2 см в поперечнике, сформированный двумя пирамидами. В его центральной части находится ранний кристалл турмалина (затравка) также без призмы, окруженный 9 зонами роста (рис. 9).

Для химического состава турмалина характерно содержание оксида железа (сотые доли %) и натрия (десятые доли), но значения MgO составляют свыше 14%, CaO — до 4,9%. Геохимической особенностью данного турмалина является заметное уменьшение содержаний Mg , Ca ,

Na , Ti , V , F от центра кристалла к периферии, а Si и Al — увеличение в том же направлении (табл. 1, 2). Аналогичное явление, но для турмалина из пегматитовой жилы Музейная, было установлено [17]. Турмалин содержит Cr до 0,06, V до 0,8 и F до 1,3 мас.%. На диаграмме составов турмалина [10] исследуемые образцы попадают в поле увита.

Данную минеральную ассоциацию турмалина можно сравнить с магалами — рудой, содержащей ювелирную шпинель. Они сложены серпентином и хлоритом, а также гидроталькитом [9], которого нет в изучаемой породе. В ней присутствует не характерное для магалов большое количество карбонатов. Для химического состава серпентин-хлоритового агрегата характерны высокие содержания магнезии, более 34, и оксида кальция — выше 13 мас.%, а также очень высокие содержания легколетучих — потери при прокаливании составили выше 29 мас.% (табл. 3).

Исследуемые турмалины обладают красивым зеленым цветом и при относительно небольшом



Рис. 7. Отпечаток вершины турмалина в серпентин-хлоритовой массе

Fig. 7. Imprint of a tourmaline crystal's top in serpentine-chlorite mass



Рис. 8. Пустотка вблизи турмалина, выполненная кристаллами арагонита, длина 1,5 см

Fig. 8. Cavity near tourmalines, containing aragonite crystals, length around 1.5 cm

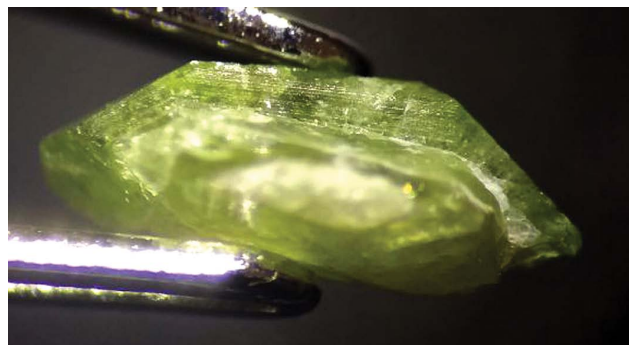


Рис. 9. Поперечный срез зонального кристалла турмалина, длина 2,2 см

Fig. 9. Cross section of a tourmaline crystal showing zonal structure, 2.2 cm

Таблица 1. Химический состав зеленого турмалина от центра зерна к периферии
Table 1. Chemical composition of green tourmaline from center to periphery

№	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	Cr ₂ O ₃	V ₂ O ₃	F	B ₂ O ₃	сумма
1	35,61	1,40	25,42	0,03	14,14	4,92	0,11	0,06	0,82	1,17	10,00	93,68
2	35,94	1,12	26,25	0,02	14,27	4,50	0,19	0,05	0,32	1,33	10,00	93,99
3	35,37	1,09	26,63	-	13,94	4,50	0,20	0,03	0,16	1,19	10,00	93,11
4	35,48	1,44	26,79	0,01	13,82	4,35	0,23	0,01	0,12	1,07	10,00	93,32
5	35,21	1,38	27,45	-	13,37	4,23	0,25	0,02	0,18	0,93	10,00	91,02
6	35,17	1,62	27,51	0,01	13,63	4,23	0,25	0,02	0,14	0,91	10,00	94,49
7	35,24	1,57	27,16	0,02	13,55	4,18	0,26	0,02	0,18	0,88	10,00	94,06
8	35,85	0,74	27,79	0,03	13,81	4,17	0,25	0,02	0,11	1,15	10,00	94,92
9	35,88	0,78	27,29	0,02	13,76	4,07	0,28	0,05	0,24	1,05	10,00	93,42
10	35,20	1,09	28,42	0,01	13,07	3,93	0,28	-	0,15	0,89	10,00	93,04
11	35,91	0,57	28,54	0,03	12,35	2,87	0,42	0,05	0,76	0,43	10,00	94,13
12	36,07	0,41	28,71	0,02	12,44	2,79	0,46	0,06	0,65	0,36	10,00	91,97
13	36,22	0,58	29,33	0,01	12,44	2,48	0,52	0,03	0,09	0,60	10,00	92,30
14	36,08	0,72	28,40	0,01	12,56	2,62	0,49	0,06	0,29	0,61	10,00	91,84
15	36,18	0,38	29,20	0,03	11,79	2,14	0,51	0,05	0,64	0,16	10,00	92,08
16	36,00	0,36	30,33	0,02	11,69	1,81	0,65	0,03	0,07	0,13	10,00	91,09
17	36,09	0,35	29,98	0,02	11,69	1,78	0,63	0,05	0,14	0,21	10,00	90,95
18	36,45	0,34	30,31	0,02	11,76	1,76	0,63	0,02	0,16	0,20	10,00	91,65
19	36,46	0,36	30,25	0,01	11,62	1,68	0,65	0,06	0,14	0,14	10,00	91,67
20	36,37	0,35	30,23	0,02	11,67	1,68	0,64	0,01	0,13	0,09	10,00	91,19
21	36,36	0,32	30,42	0,02	11,63	1,67	0,66	-	0,19	0,14	10,00	91,41

Примечание. Содержание B₂O₃ — не определялось, расчетное. В 7-й и 9-й пробах установлен СоО до 0,01%.

количестве трещин могут быть использованы в качестве ограночного материала. Овальные кристаллы позволяют без особых затруднений придавать им форму кабошона (рис. 10).

Условия образования турмалина

Наблюдения за соотношениями минералов магнезиальных скарнов и турмалина на месторождении Кухилал позволили нам сделать вывод об их сингенетичности. Рассматриваемый турмалин образовался в условиях гранулитовой фации метаморфизма. Вышеприведенные материалы демонстрируют очевидную генетическую связь турмалина с магнезиальными скарнами.

Ранее на месторождениях магнезиально-скарновой формации, которые можно сравнивать с Кухилалом, было установлено, что боратные минералы, включая турмалин, образуются на поздней стадии скарнового процесса [11, 12, 15]. Упомянутые авторы отмечают редкость турмалина в магнезиальных скарнах. Бор, который является одним

из главных элементов турмалина, по их мнению, был привнесен.

Источник бора для турмалина из магнезиально-скарновой формации Кухилала мы предполагаем в составе протомгнезитов. Они образовались в обстановке соленосного мелководного морского бассейна. П.П. Смолин [14] отнес магнезиты, вмещающие магнезиальные скарны, к магнезиально-карбонатной формации, образовавшейся в результате процесса эвапоризации. Осадочный бор для турмалина также парагенетически связан с этой формацией. В ее контурах наряду с различными солями бора мог бы сформироваться апоосадочный турмалин. Аутигенное образование турмалина было установлено в составе юрских соленосных отложений месторождения Ходжа-Мумин. На этом месторождении были обнаружены бесцветные двухвершинные длинно-призматические кристаллы турмалина размером 2×0,2 мм в галите и соленосной глине [10]. Месторождение галита Ходжа-Мумин расположено

Таблица 2. Формульные коэффициенты турмалина, рассчитанные на 19 катионов
Table 2. Formula coefficients of tourmaline, counted for 19 cations

№	Si	Ti	Al	Mg	Ca	Na	Cr	V	F
1	6,09	0,18	5,12	3,60	0,90	0,04	0,01	0,11	0,63
2	6,11	0,14	5,26	3,62	0,82	0,06	0,01	0,04	0,71
3	6,06	0,14	5,37	3,56	0,83	0,07	-	0,02	0,64
4	6,06	0,18	5,39	3,52	0,80	0,08	-	0,02	0,58
5	6,03	0,18	5,54	3,41	0,78	0,08	-	0,02	0,5
6	6,00	0,21	5,52	3,46	0,77	0,08	-	0,02	0,49
7	6,03	0,20	5,47	3,46	0,77	0,08	-	0,02	0,48
8	6,08	0,09	5,55	3,49	0,76	0,08	-	0,02	0,62
9	6,11	0,10	5,48	3,49	0,51	0,09	0,01	0,03	0,56
10	6,02	0,14	5,72	3,33	0,72	0,09	-	0,02	0,48
11	6,19	0,07	5,80	3,18	0,53	0,14	0,01	0,1	0,24
12	6,20	0,05	5,72	3,19	0,51	0,15	0,01	0,09	0,19
13	6,21	0,07	5,93	3,18	0,46	0,17	-	0,01	0,32
14	6,23	0,09	5,77	3,23	0,48	0,17	0,01	0,04	0,33
15	6,27	0,05	5,97	3,05	0,40	0,17	0,01	0,09	0,09
16	6,22	0,05	6,17	2,86	0,33	0,22	-	0,01	0,07
17	6,25	0,05	6,12	2,91	0,33	0,21	0,01	0,02	0,12
18	6,27	0,04	6,14	2,90	0,32	0,21	-	0,02	0,11
19	6,29	0,05	6,15	2,86	0,31	0,22	0,01	0,02	0,07
20	6,28	0,05	6,15	2,87	0,31	0,21	-	0,02	0,05
21	6,26	0,04	6,17	2,85	0,31	0,22	-	0,03	0,08

Таблица 3. Химический состав серпентин-хлоритовой массы без турмалина, в мас. %
Table 3. Chemical composition of serpentine-chlorite mass, excluding tourmaline (wt %)

SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	п.п.п.	сумма
19,86	0,03	2,94	0,15	0,06	34,32	13,33	0,03	0,04	0,03	29,04	99,83

Примечание. В составе породы присутствуют в мас. %: S — 0,02, Cr и V — по 0,03, Sr — 0,01.

в 400 км к западу от Кухилала. Его территория входила в состав раннедокембрийского Ирано-Пакистанского солеродного бассейна, который был выделен М.А. Жарковым [4] и занимал площадь более 2 млн км². В юрское время процесс повторился. Юрский турмалин из Ходжа-Мумина позволяет аргументировано предположить, что рассматриваемый турмалин мог бы образоваться еще в дометаморфическую стадию диагенеза в архейское время.

На прогрессивном этапе самого раннего регионального метаморфизма в условиях гранулитовой фации были сформированы шпинель, форстерит [9] и турмалин, которые мы наблюдаем в составе первой минеральной ассоциации.

Серпентин-хлоритовая порода является после-скарнововой, а турмалин в ней — реликтовым, первичным минералом. Упругие свойства этой породы способствовали сохранности кристаллов турмалина от тектонических деформаций. Его чечевицевидная форма с отсутствием в ней призм, возможно, обусловлена восстановительной средой кристаллизации при низком содержании SiO₂, характерной для Кухилала. Восстановительная среда установлена по обилию агрегатов пирротина. Концентрически-зональное строение кристаллов турмалина с многочисленными зонами роста свидетельствует о многостадийности процесса его кристаллизации.



Рис. 10. Кабошоны из исследуемых турмалинов: слева 0,3, по центру — 0,5, крупный — 7,7 карата, крайний справа — 0,36 (общая масса — 8,86 карата). На заднем плане препарированная серпентин-хлоритовая порода с одиночным кристаллом турмалина

Fig. 10. Cabachons, made from studying tourmalines: left — 0.3 ct, central small — 0.5 ct, central big — 7.7 ct, right 0.36 ct. On the background — prepared sample of serpentine-chlorite rock with a single tourmaline crystal

Заключение

1) Турмалин из магнезиальных скарнов Кухи-лала имеет весьма необычный габитус — отсутствует главная простая форма кристалла «призма». Чем обусловлено образование такой редкой формы однозначно, ответить мы не можем. Скорее всего, это связано с особенностями состава протовещества (низким содержанием SiO_2 и Al_2O_3), из которого сформировался турмалин.

2) Химический состав турмалина является отражением состава вмещающей среды. В минерале, после кремния и алюминия, доминируют магний и кальций при ничтожных содержаниях железа и натрия. Турмалин отнесен к фторсодержащему увиту.

3) Бор для турмалина сформировался на стадии седиментации эвапоритов в архейскую эру.

Метаморфизм гранулитовой фации привел к кристаллизации и перекристаллизации турмалина и определил его парагенезис с форстеритом и шпинелью.

4) В турмалине сохранились следы ранней генерации (затравочные кристаллы) и рост вокруг них новых зон кристалла. Все кристаллы и агрегаты турмалина из магалов покрыты серпентиновой оболочкой.

5) Турмалиновые магалы сформировались в послескарновую стадию. В них турмалин является реликтовым минералом, а поздние пластичные минералы (серпентин, хлорит) способствовали сохранению кристаллов в более поздних тектоно-метаморфических процессах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Буданова К.Т., Буданов В.И. Метамагматические формации Юго-Западного Памира. Душанбе: Дониш, 1983. 275 с.
2. Гуревич Я.А. Особенности геологического строения и разведки месторождений благородной шпинели Кухи-Лал (ЮЗ Памир) // В кн.: Геология, поиски и разведка месторождений цветных камней Таджикистана. Душанбе, 1987. С. 17—20.
3. Другалёва Т.А., Гуревич Я.А., Иорданский Л.В., Смолин П.П. Гипермагнезиальные скарноиды Юго-Западного Памира как уникальное гипермагнезиальное сырье // В кн.: Высокомагнезиальное минеральное сырье. М.: Наука, 1991. С. 190—218.
4. Жарков М.А. Закономерности размещения и условия образования эвапоритовых формаций, содержащих магнезиальные минералы // В кн.: Высокомагнезиальное минеральное сырье. М.: Наука, 1991. С. 61—76.
5. Киселев В.И., Буданов В.И. Месторождения докембрийской магнезиально-скарновой формации Юго-Западного Памира. Душанбе: Дониш, 1986. 223 с.

6. Колесникова Т.А. Благородная шпинель, клиногумит и манассеит месторождения Кухилал (Памир) // В кн.: Драгоценные и цветные камни. М.: Наука, 1980. С. 181—198.
7. Литвиненко А.К. Генетическая позиция благородной шпинели в магнезиальных скарнах Юго-Западного Памира // ЗВМО. 2003. Ч. XXXII. № 1. С. 76—81.
8. Литвиненко А.К. Нуристан-Южнопамирская провинция докембрийских самоцветов // Геология рудных месторождений. 2004. Т. 46. № 4. С. 305—312.
9. Литвиненко А.К., Романова Е.И. Роль пустот в образовании кристаллов на месторождении благородной шпинели Кухи-Лал, Юго-Западный Памир // Отечественная геология. 2020. № 1. С. 79—86.
10. Минералы. М.: Наука, 1981. 613 с.
11. Перцев Н.Н. Высокотемпературный метаморфизм и метасоматизм карбонатных пород. М.: Наука, 1977. 256 с.
12. Перцев Н.Н., Кулаковский А.Л. Структурно-петрологическая эволюция Таёжного боро-железородного месторождения (Центральный Алдан, Россия) // Геология рудных месторождений. 2002. Т. 44. № 1. С. 3—21.
13. Расчленение стратифицированных и интрузивных образований Таджикистана. Душанбе: Дониш, 1976. 207 с.
14. Смолин П.П. Условия формирования месторождений магнетита, талька и брусита в эволюции магнезиально-карбонатных толщ // Геохимия. Петрология (Докл. сов. геологов на XXV сессии МГК). М.: Наука. 1976. С. 450—457.
15. Шабынин Л.И. Формация магнезиальных скарнов. М.: Наука, 1973. 213 с.
16. Файзиев А.Р., Эльназаров С.А. Минералогические особенности и генезис Кухилальского месторождения благородной шпинели (Юго-Западный Памир). Душанбе; Дониш, 2016. 135 с.
17. Яковлева О.С., Пеков И.В., Кононкова Н.Н. Новые данные о турмалинах месторождения Кухилал (Юго-Западный Памир). Мат-лы V Междунар. симпозиума «Минералогические музеи». СПб., 2005. С. 204—205.

REFERENCES

1. Budanova K.T., Budanov V.I. Metamagmatic formations of the Southwestern Pamirs. Dushanbe: Donish, 1983. 275 p. (In Russian).
2. Gurevich Ya.A. Features of the geological structure and exploration of deposits of noble spinel of Kuhlal (Southwestern Pamirs) // In book: Geology, prospecting and exploration of deposits of colored stones of Tajikistan. Dushanbe, 1987. P. 17—20 (In Russian).
3. Drugaleva T.A., Gurevich Ya.A., Jordansky L.V., Smolin P.P. Hypermagnesial skarnoids of the Southwestern Pamirs as a unique hypermagnesial raw material // In book: High-magnesian mineral raw materials. Moscow: Nauka, 1991. P. 190—218 (In Russian).
4. Zharkov M.A. Regularities of placement and conditions of formation of evaporite formations containing magnesian minerals // In book: High-magnesian mineral raw materials. Moscow: Nauka, 1991. P. 61—76 (In Russian).
5. Kiselev V.I., Budanov V.I. Deposits of the Precambrian magnesia-scarn formation of the Southwestern Pamirs. Dushanbe: Donish, 1986. 223 p. (In Russian).
6. Kolesnikova T.A. Noble spinel, clinohumite and manasseite deposits of Kuhlal (Pamir) // In book: Precious and colored stones. Moscow: Nauka, 1980. P. 181—198 (In Russian).
7. Litvinenko A.K. The genetic position of noble spinel in the magnesian skarns of the Southwestern Pamirs // ZVMO. 2003. Ch. XXXIII. No. 1. P. 76—81 (In Russian).
8. Litvinenko A.K. Nuristan-South Pamir province of Precambrian gems // Geology of ore deposits. 2004. Vol. 46. No. 4. P. 305—312 (In Russian).
9. Litvinenko A.K., Romanova E.I. The role of voids in the formation of crystals at the Kuhlal noble spinel deposit, South-Western Pamir // Domestic Geology. 2020. No. 1. P. 79—86 (In Russian).
10. Minerals. Moscow: Nauka, 1981. 613 p. (In Russian).
11. Pertsev N.N. High-temperature metamorphism and metasomatism of carbonate rocks. Moscow: Nauka, 1977. 256 p. (In Russian).
12. Pertsev N.N., Kulakovskiy A.L. Structural and petrological evolution of the Taiga boron-iron ore deposit (Central Aldan, Russia) // Geology of ore deposits. 2002. Vol. 44. No. 1. P. 3—21 (In Russian).
13. Dismemberment of stratified and intrusive formations of Tajikistan. Dushanbe: Donish, 1976. 207 p. (In Russian).
14. Smolin P.P. Conditions of formation of deposits of magnesite, talc and brucite in the evolution of magnesia-carbonate strata // Geochemistry. Petrology (Dokl. sov. geologists at the XXV session of the MGK). Moscow: Nauka, 1976. P. 450—457 (In Russian).
15. Shabynin L.I. Formation of magnesian skarns. Moscow: Nauka, 1973. 213 p. (In Russian).
16. Fayziev A.R., Elnazarov S.A. Mineralogical features and genesis of the Kuhlal noble spinel deposit (Southwestern Pamir). Dushanbe; Donish, 2016. 135 p. (In Russian).
17. Yakovleva O.S., Pekov I.V., Kononkova N.N. New data on tourmalines of the Kuhlal deposit (South-Western Pamir) // Proceedings of the V International Symposium "Mineralogical Museums". Saint-Peterburg, 2005. P. 204—205 (In Russian).

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Литвиненко А.К. — разработал концепцию и подготовил текст статьи, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Романова Е.И. — обработала и проанализировала минералогические данные, подготовила графическую информацию, утвердила публикуемую версию статьи и согласна принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Якушина О.А. — обработала и проанализировала кристаллохимические и рентгеноструктурные данные, подготовила графическую информацию, утвердила публикуемую версию статьи и согласна принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Andrey K. Litvinenko — developed the concept and prepared the text of the article, finally approved the published version of the article and agrees to take responsibility for all aspects of the work.

Ekaterina I. Romanova — processed and analyzed mineralogical data, prepared graphical information, approved the published version of the article and agrees to take responsibility for all aspects of the work.

Olga A. Yakushina — processed and analyzed crystal chemical and X-ray structural data, prepared graphical information, approved the published version of the article and agrees to take responsibility for all aspects of the work.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Литвиненко Андрей Кимович* — доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры минералогии и геммологии ФГБОУ ВО «Российский государственный университет имени Серго Орджоникидзе».

23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117997, Россия

e-mail: akl1954@yandex.ru

тел.: +7 (916) 655-08-08

SPIN-код: 6127-2320

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1779-5391>

Andrey K. Litvinenko* — Dr. of Sci. (Geol.-Min.), Prof. of the Department of Mineralogy and Gemmology of the Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting

23, Miklukho-Maklaya st., Moscow 117997, Russia

e-mail: akl1954@yandex.ru

tel.: +7 (916) 655-08-08

SPIN-code: 6127-2320

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1779-5391>

Романова Екатерина Ивановна — старший преподаватель кафедры минералогии и геммологии ФГБОУ ВО «Российский государственный университет имени Серго Орджоникидзе»

23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117997, Россия

e-mail: romanovaei@mgri.ru

тел.: +7 (916) 520-78-06

SPIN-код: 4657-5368

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2763-6626>

Ekaterina I. Romanova — senior lecturer of the Department of Mineralogy and Gemmology Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting

23, Miklukho-Maklaya st., Moscow 117997, Russia

e-mail: romanovaei@mgri.ru

tel.: +7 (916) 520-78-06

SPIN-code: 4657-5368

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2763-6626>

Якушина Ольга Александровна — доктор технических наук, ведущий научный сотрудник ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М. Федоровского»; профессор кафедры общей и прикладной геофизики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Университет «Дубна».

31, Старомонетный пер., г. Москва 119017, Россия

19, ул. Университетская, г. Дубна, Московская область 141980, Россия

e-mail: yak_oa@mail.ru

тел.: +7 (916) 770-28-30

SPIN-код: 1806-2277

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1166-1448>

Olga A. Yakushina — Dr. of Sci. (Tech.), Leading Researcher, All-Russian Scientific-Research Institute of Mineral Resources named after N. M. Fedorovsky, Prof. of the General and Applied Geophysics Department, Dubna University.

31, Staromonetny lane, Moscow 119017, Russia

19, Universitetskaya str., Dubna, Moscow region 141980, Russia

e-mail: yak_oa@mail.ru

tel.: +7(916)770-28-30

SPIN-code: 1806-2277

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1166-1448>

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author