
МИНЕРАЛЫ И ПАРАГЕНЕЗИСЫ МИНЕРАЛОВ

**МИНЕРАЛЫ НАДГРУППЫ ТУРМАЛИНА ИЗ РЕДКОМЕТАЛЬНЫХ
ПЕГМАТИТОВ РАЙОНА ВОРОНЬИХ ТУНДР
(КОЛЬСКИЙ ПОЛУОСТРОВ, РОССИЯ)**

© 2022 г. д. чл. Н. И. Пономарева¹, *, д. чл. **В. В. Гордиенко**¹, Н. О. Мельянцева¹

¹*Санкт-Петербургский государственный университет,
Университетская наб., 7/9, Санкт-Петербург, 199034 Россия*

**e-mail: n_ponomareva@mail.ru*

Поступила в редакцию 24.05.2021 г.

После доработки 11.02.2022 г.

Принята к публикации 07.04.2022 г.

Статья посвящена результатам изучения темноокрашенного, ярко- и бледно-розового турмалинов из редкометалльных пегматитов г. Охмыльк района Воронья тундра. Приведены химические составы турмалинов и параметры их элементарных ячеек. Показано, что темноокрашенный турмалин I является шерлом-оленинитом, а розовый турмалин эльбаитом-оленинитом. Проведен сравнительный анализ исследованных турмалинов и турмалинов из ряда сподуменовых пегматитов других регионов. Изучено распределение РЗЭ в турмалинах, показано, что они формировались при участии высокотемпературных постмагматических растворов. Минеральные включения в шерлолените представлены биотитом и магнетитом, в эльбаит-оленините – касситеритом, поллуцитом, апатитом, танталитом. Танталит характеризуется повышенным содержанием тантала и незначительным количеством ниобия; кроме того, в эльбаит-оленините часто присутствует чистый мангантанталит, а по контакту включений танталита и турмалина развивается симпсонит. Это свидетельствует о формировании альбит-сподуменовых пегматитов района при активной роли метасоматических процессов.

Ключевые слова: сподуменовые пегматиты, турмалин, шерл, эльбаит, включения в турмалине

DOI: 10.31857/S086960552203008X

До настоящего времени турмалин из редкометалльных пегматитов района Воронья тундра в литературе описывался дважды: в книге А.Ф. Соседко (1961) и – розовый турмалин – оленит, который был здесь открыт – в работе П.Б. Соколова и соавторов (1986). Информация о химическом составе шерла и эльбаита из пегматитовых жил, о структурных параметрах минералов, о включениях в них в публикациях отсутствует несмотря на большое количество минералого-геохимических работ по региону (Соседко, 1961; Гордиенко, 1970; Волошин и др., 1977; Соколов и др., 1986; Гордиенко, 1996; Гавриленко и др., 2002; Морозова, 2018).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучение морфологии турмалина и особенностей структуры турмалинсодержащих агрегатов, окаймляющих кристаллы шерла, проводилось с помощью поляризационного микроскопа Leica DM4500 P, снабженного цифровой камерой Leica DFC 495.

Химический состав минералов изучался: (1) на сканирующем электронном микроскопе CAMSCAN-4DV (Великобритания) с полупроводниковым спектрометром для количественного определения макроэлементов AN-10000 (аналитик Ю.Л. Крецер). Условия анализа: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток 1 нА. Обработка данных анализа проводилась с использованием программы ZAF-4/FLS; (2) с помощью электронного сканирующего микроскопа SEM-501 Hitachi S-3400N, оснащенного энергодисперсионным спектрометром Oxford X-max 20 (Ресурсный Центр СПбГУ “Геомодель”, аналитики Н.С. Власенко и В.В. Шиловских). Условия съемки: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток 1.5 нА.

Содержания элементов-примесей в турмалине выполнено методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) при помощи квадрупольного масс-спектрометра ELAN 6100 DRC фирмы PerkinElmer и лазерного дозатора LSX-200 фирмы CETAC TECHNOLOGIES (ВСЕГЕИ, аналитик В.А. Шишлов).

Рентгеновские исследования выполнены на автоматическом порошковом дифрактометре Ultima IV (Rigaku) (Ресурсный Центр СПбГУ “Рентгенодифракционные методы исследования”, аналитик Н.В. Платонова). Излучение рентгеновской трубки $\text{CuK}_{\alpha_{1+2}}$, длины волн $\lambda\text{CuK}_{\alpha_1} = 1.54059 \text{ \AA}$ и $\lambda\text{CuK}_{\alpha_2} = 1.54443 \text{ \AA}$, режим работы трубки 40 кВ/30мА, позиционно-чувствительный детектор, геометрия на отражение, схема фокусировки Брегг-Брентано, скорость вращения образца 20 оборотов в минуту, температура 25 °С, атмосфера—воздух. Идентификация фаз проводилась с использованием программного комплекса PDXL2 (Rigaku) и базы порошковых дифракционных данных Powder Diffraction File (PDF-2, 2016).

Состав минеральных включений в турмалине изучался на рамановском спектрометре Horiba LabRam HR800 (Ресурсный Центр СПбГУ “Геомодель”, аналитик В.Н. Бочаров). Регистрация спектров комбинационного рассеяния выполнена в спектральном диапазоне 4000–100 см^{-1} . Источником возбуждения служил аргоновый лазер с длиной волны 514.5 и 488 нм. Мощность лазера – 50 мВт, время экспозиции – от 2 до 10 с, число повторений – от 2 до 15, увеличение микроскопа – 50×. Калибровка прибора осуществлялась по Si-эталоны (520.7 см^{-1}). Использовалась дифракционная решетка 1800 ш/мм, диаметр конфокального отверстия 300 мкм.

Детальное исследование турмалина и микроанализ включений производились на сканирующем электронном микроскопе Hitachi TM 3000 с приставкой для энергодисперсионного микроанализа OXFORD в режиме низкого вакуума, что позволяло использовать непроводящие образцы без предварительного напыления, а также с помощью многофункционального растрового электронного микроскопа Quanta 200 3D, представляющего собой комбинацию двух систем: растрового электронного микроскопа (РЭМ), дающего изображения разнообразных образцов в цифровой форме с увеличением более 100000 крат, и фокусированного ионного пучка (Ресурсный Центр СПбГУ “Микроскопии и микроанализа”, аналитики С.Ю. Янсон и Н.С. Овчинникова).

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Геологическая позиция района месторождения подробно описана в ряде публикаций (Соседко, 1961; Гордиенко, 1970; Гавриленко и др., 2002; Пеков, Кононкова, 2010; Морозова, 2018). Пегматитовое поле Колмозеро – Воронья тундра, известное с конца 1940-х гг., находится на Кольском полуострове, в Мурманской области, в северо-восточной части Балтийского щита. Район распространения пегматитов сложен породами, метаморфизованными в западной его части в условиях ставролит–андалузитовой субфации амфиболитовой фации (550–600 °С, 3.0–3.5 кбар), в восточной – в условиях кианит–силлиманитовой субфации амфиболитовой фации (5.2–8.5 кбар) (Соседко, 1961; Гордиенко, 1970; Гавриленко и др., 2002; Пеков, Кононкова, 2010). Интрузивные породы в районе распространения пегматитов представлены олигоклазовыми

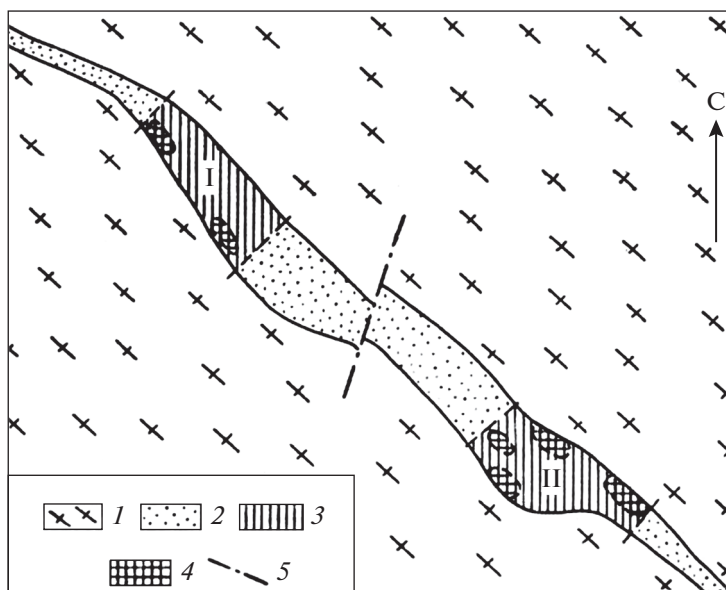


Рис. 1. Схема расположения пегматитовых полей (Гордиенко, 1970).

1 – архейские гнейсо-граниты, 2 – породы нижнепротерозойской геосинклинальной зоны, 3 – площади пегматитовых полей, 4 – площади пегматитовых кустов, 5 – региональный разлом палеозойского возраста. I – Северо-Западное пегматитовое поле, II – Южное пегматитовое поле.

Fig. 1. Layout of pegmatite fields (Gordienko, 1970).

1 – Archean gneiss-granites, 2 – rocks of the Lower Proterozoic geosynclinal zone, 3 – areas of pegmatite fields, 4 – areas of pegmatite bushes, 5 – Paleozoic regional fault. I – North-Western pegmatite field, II – Southern pegmatite field.

гнейсо-гранитами и турмалиновыми гранитами. Олигоклазовые гнейсо-граниты мигматизированы и микроклинизированы вплоть до образования микроклиновых гранитов. По данным А.А. Полканова и Э.К. Герлинга (1960), возраст неизмененных (немигматизированных) гнейсо-гранитов, определенный К-Аг методом по биотиту, составляет 3500–3100 млн лет. Возраст редкометалльных пегматитов, определенный Rb-Sr методом по мусковиту, лепидолиту и микроклину, варьирует в широких пределах (от 2600 до 1930 млн лет). Pb-Pb возраст турмалиновых гранитов составляет 2558 ± 6 млн лет (Гавриленко и др., 2002). U-Pb возраст микролита из редкометалльных пегматитов месторождения Васин-Мыльк (Воронья тундра) с продуктивной ассоциацией лепидолит-альбит-микроклин-сподумен-поллуцит равен 2454 ± 8 млн лет. Данные по возрасту полевошпатовых и мусковит-полевошпатовых пегматитов отсутствуют (Морозова и др., 2018).

В пределах зоны Колмозеро – Воронья тундра пегматиты залегают среди толщи эффузивно-осадочных пород, либо локализованы в пределах прорывающих ее интрузивных массивов. Наиболее изучены два участка, названные А.Ф. Соседко (1961) Северо-Западным и Южным пегматитовыми полями (рис. 1).

Пегматитовые жилы Южного пегматитового поля детально изучались В.В. Гордиенко (1970). Эти жилы образуют Колмозерское месторождение редкометалльных пегматитов, являющееся наиболее крупным месторождением лития в России (Быховский, Архипова, 2016).

Северо-Западное или Вороньегундровское пегматитовое поле находится на правом берегу р. Воронья, в среднем ее течении (Соседко, 1961; Пеков, Кононкова, 2010). Редкометалльные пегматиты г. Охмыльк, относящиеся к Северо-Западному пегматитовому полю, расположены в грабен-синклинии, сложенной верхнеархейскими породами зеленокаменного пояса Колмозеро-Воронья: осадочными, эффузивными и интрузивными, метаморфизованными в условиях амфиболитовой фации. Пегматиты, связанные с двуслюдяными пегматоидными гранитами, относятся к позднеархейским образованиям (Пеков, Кононкова, 2010). Они установлены в виде жил, залегающих главным образом в параамфиболитах.

ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ ПЕГМАТИТОВЫХ ЖИЛ

Пегматитовые жилы района Колмозеро – Воронья тундра относятся к пегматитам редкометалльной формации, литий-цезиевой подформации. По минеральному составу и степени дифференциации они разделяются на три типа (Соседко, 1961; Гордиенко, 1970; Гордиенко, 1996).

1. Пегматиты полевошпатового типа с высоким содержанием полевых шпатов (60–70%). Микроклин в них (30–60%), как правило, преобладает над плагиоклазом (10–30%), на долю кварца приходится 30–40%, мусковита – около 1%. Из второстепенных минералов наиболее часто встречаются биотит, турмалин (шерл), гранат (спессартин), магнетит и ильменит. В отдельных жилах в очень небольшом количестве содержатся берилл, ильменорутит, пироклор, молибденит и колумбит.

2. Пегматиты мусковит-полевошпатового типа. По минеральному составу они близки к пегматитам первого типа. Отличие заключается в более высоком содержании мусковита (от 5 до 10–12%). Около 35–50% здесь составляет микроклин, 25–30 – кварц и 15–30% приходится на долю плагиоклаза (альбита). В качестве второстепенных минералов характерно присутствие турмалина – шерла (до 1–3%) и сине-зеленого Mn-содержащего апатита (0.5–1%). Берилл и колумбит-танталит являются типичными акцессорными минералами пегматитов этого типа.

3. Пегматиты сподуменового типа. Они характеризуются высоким содержанием сподумена (18–20%), который играет здесь роль породообразующего минерала. Содержание кварца составляет 30–35%, на долю альбита (An_{0-6}) приходится 30–33%, микроклина – 10–25%, мусковита – 5–7%. Из второстепенных и акцессорных минералов наиболее часто встречаются турмалин, сине-зеленый Mn-содержащий апатит, гранат (спессартин), берилл, колумбит-танталит и трифилин-литофилит. При этом на Колмозерском месторождении установлен только шерл, тогда как для Вороньегундровского месторождения характерны и шерл, и эльбаит.

Нами исследованы турмалины из пегматитовой жилы № 2 г. Охмыльк, являющейся представителем поллуцит-лепидолит-сподумен-микроклин-альбитового подтипа. Постмагматическая минерализация представлена здесь помимо лепидолита и поллуцита, амблигонитом, бериллом, колумбит-танталитом, турмалином, холмквиститом и эвкрипитом (Гордиенко, 1996).

Ниже приводится характеристика этого пегматитового тела, данная в работе А.Ф. Соседко (1961) и дополненная наблюдениями В.В. Гордиенко.

Пегматитовая жила имеет неправильную форму, северо-восточное простирание и падение на юго-восток под углами 25°–30°. Мощность ее варьирует от 1 до 5 м. На рис. 2 приведена зарисовка пегматитовой жилы, выполненная А.Ф. Соседко (1961), показан ее контакт с вмещающими породами, представленными рассланцованными амфиболитами. В виде неровной каймы отмечена оторочка мощностью от 0.2 до 0.8–1 см, образованная мелкими кристаллами черного турмалина. От контакта по направлению к центру пегматитового тела выделены следующие зоны:

– приконтактная кварц-олигоклазовая зона средне- и мелкозернистой структуры;

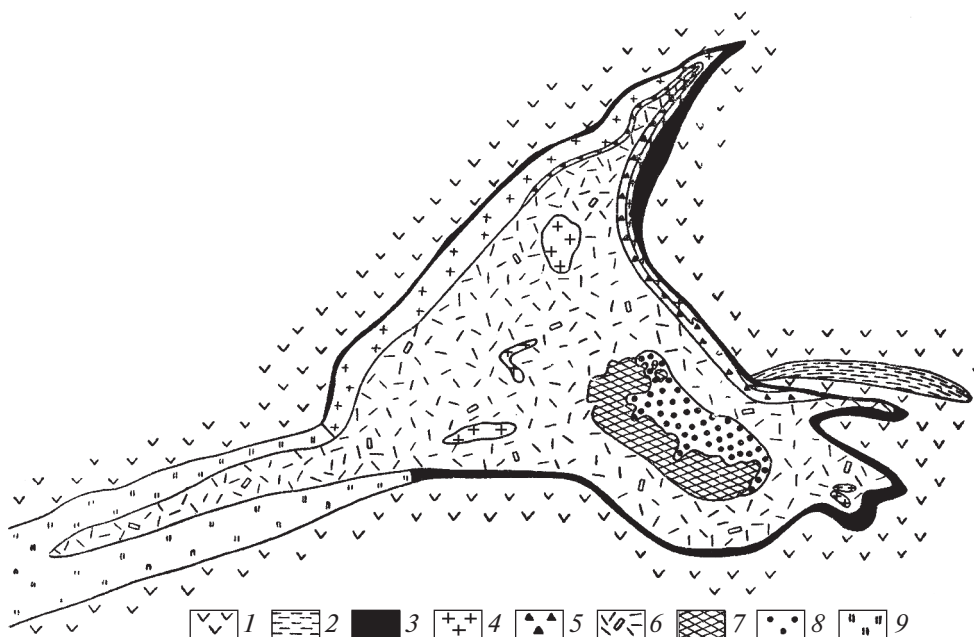


Рис. 2. Схема строения пегматитовой жилы сподуменового типа (Соседко, 1961).

1 – сланцеватый амфиболит, 2 – турмалиновая порода, 3 – приконтактная кварц-олигоклазовая зона средне- и мелкозернистой структуры, 4 – кварц-олигоклазовая зона мелкозернистой структуры с микроклином, 5 – кварц-олигоклазовая зона, обогащенная шерлом, 6 – кварц-альбитовая зона неравнозернистой структуры со сподуменом, мусковитом, танталитом и бериллом, 7 – зона блокового кварц-микроклинового пегматита с участками мусковитового грейзена, 8 – кварцевое ядро, 9 – нерасчлененный пегматит.

Fig. 2. Diagram of spodumene pegmatite veins type (Sosedko, 1961).

1 – shaly amphibolite, 2 – tourmaline rock, 3 – near-contact quartz-oligoclase zone with medium and fine grained structure, 4 – quartz-oligoclase zone with fine-grained structure enriched with microcline, 5 – quartz-oligoclase zone enriched with schorl, 6 – quartz-albite zone with uneven structure enriched with spodumene, muscovite, tantalite, and beryl, 7 – area of the block quartz-microcline pegmatite with areas of the muscovite greisen, 8 – quartz core, 9 – undifferentiated pegmatite.

- кварц-олигоклазовая зона мелкозернистой структуры с микроклином;
- кварц-олигоклазовая зона, обогащенная шерлом; структура ее мелкозернистая до среднезернистой;
- зона блокового кварц-микроклинового пегматита с участками мусковитового грейзена;
- кварц-альбитовая зона со сподуменом, мусковитом, бериллом, танталитом; структура среднезернистая до грубозернистой (зона замещения);
- кварц-альбитовая зона с поллуцитом, лепидолитом, сподуменом, бериллом, амблигонитом, танталитом, розовым и полихромным турмалином; структура грубозернистая; структура грубозернистая (зона замещения).

Положение двух последних зон в теле жилы на рис. 2 не показано.

Кварц-олигоклазовая зона с шерлом располагается близ контакта пегматитового тела с амфиболитами. Минеральный состав зоны включает плагиоклаз, кварц, шерл, манганотанталит и редко мусковит.

Большую часть зоны составляет олигоклаз серовато-белого цвета (90%); кварц серого цвета наблюдается в виде мелких отдельных зерен. Шерл присутствует в виде кристаллов, ориентированных перпендикулярно контакту пегматитовой жилы. Здесь же встречаются редкие зерна манганотанталита размером до 0.6 см и чешуйки мусковита.

Зона блокового микроклина располагается непосредственно за краевой кварц-олигоклазовой зоной с шерлом в виде участков неправильной формы. Микроклин частично альбитизирован.

Кварц-альбитовая зона со сподуменом, мусковитом, бериллом и танталитом прослеживается в виде полосы в лежащем боку пегматитового тела на границе с кварц-олигоклазовой зоной и блоковым микроклином; кварц-альбитовые прожилки и участки неправильной формы наблюдаются среди блокового микроклина. Местами в кварц-альбитовой зоне сохраняются реликты блокового микроклина. Здесь встречается сподумен, иногда — мусковит в виде отдельных скоплений. В альбите наблюдаются мелкие пластинки черного танталита.

Кварц-альбитовая зона с поллуцитом, лепидолитом, сподуменом, амблигонитом, симпсонитом, танталитом, розовым турмалином и мусковитом расположена на границе блокового микроклина с кварц-альбитовой-сподуменной зоной, а также среди блокового микроклина в виде прерывистых участков неправильной формы. Эльбаит образует скопления мелких кристаллов совместно с мусковитом.

Минеральный состав пегматитовой жилы № 2 г. Охмыльк отражен в табл. 1. Как следует из таблицы, шерл наблюдается совместно с биотитом, холмквиститом, олигоклазом и микроклином. Для эльбаита характерна ассоциация с альбитом, микроклином, сподуменом, лепидолитом, поллуцитом, монтебразитом-амблигонитом, холтитом и танталсодержащими минералами.

МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ТУРМАЛИНА

В редкометальных пегматитах Вороньей тундры встречаются черный шерл, ярко-розовый до красного эльбаит и розовый оленит в отличие от пегматитов Колмозерского месторождения, где установлен только шерл (Соседко, 1961; Гордиенко, 1970; Соколов и др., 1986).

Шерл и эльбаит в редкометальных пегматитах Вороньей тундры приурочены к определенным минеральным ассоциациям и характерны для определенных зон пегматитовых тел. Шерл наблюдается в краевых зонах, где он образует кристаллы, располагающиеся перпендикулярно к поверхности контактов жил. Размеры кристаллов шерла варьируют от микроскопических до 20–30 мм. Он ассоциирует с микроклином, олигоклазом, холмквиститом, биотитом, кварцем и иногда с магнетитом. К центру жилы изменяется минеральный состав пегматитовых тел — биотит и холмквистит совершенно исчезают, олигоклаз сменяется альбитом, появляется сподумен.

Эльбаит, как правило, встречается в центральных частях жил в ассоциации с лепидолитом, поллуцитом, монтебразитом и танталсодержащими минералами.

Оленит установлен в центральных частях жил, где он образует игольчатые бледно-розовые хорошо ограненные кристаллы размером 0.5×3.0 мм в агрегате мелкопластинчатого альбита (Соколов и др., 1986).

В изученных образцах выделено три морфологические разновидности турмалина (Мельянцов и др., 2019).

Турмалин I представлен кристаллами, центральные части которых окрашены в темно-зеленый до черного цвета, периферические участки имеют голубовато-зеленый оттенок. Каждый кристалл турмалина I окружен кварц-альбитовым агрегатом с бледно-розовым турмалином, размером до 0.05 мм.

Турмалин II представлен ярко-розовыми одиночными кристаллами, реже наблюдаются в виде шестоватых агрегатов.

Таблица 1. Минералы, установленные в пегматитовой жиле № 2 г. Охмыльк
Table 1. Minerals established in the pegmatite vein No 2 of M. Okhmylk

Минерал	Местоположения в жиле	Источник информации
<i>Ранние минеральные ассоциации с шерлом</i>		
Литиево-железистая слюда Холмквистит Плагиоклаз-олигоклаз Микроклин Шерл	В приконтактной зоне	Соседко (1961), Гордиенко (1979; 1996)
<i>Поздние минеральные ассоциации с эльбаитом</i>		
Эльбаит Альбит Сподумен Апатит Мусковит Амблигонит-монтебразит Алюмолитиевая слюда (“лепидолит”) Поллуцит Оленит Эвкрипит Минералы тантала и ниобия (манганотанталит, симпсонит, стибийотанталит и микролит) Холтит	В промежуточной зоне (между приконтактной и центральной зонами) и в центральной зоне Установлены только в центральных частях жил	Соседко (1961); Гордиенко (1996) Соколов и др. (1986) Гордиенко (1957) Соседко (1961) Волошин и др. (1977)

Турмалин III в виде зерен бледно-розового цвета совместно с кварцем и альбитом образует мелкозернистые агрегаты вокруг кристаллов турмалина I (рис. 3, 4). Зерна турмалина в этих агрегатах разноориентированы, часто подобные агрегаты содержат мельчайшие включения танталсодержащих минералов. По-видимому, турмалин III является наиболее поздней генерацией минерала.

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ТУРМАЛИНА

Анализ литературных источников, посвященных особенностям минерального состава редкометалльных пегматитов района Колмозеро-Воронья (Соседко, 1961; Гордиенко, 1970; Гордиенко, 1996; Гранитные пегматиты, 1997; Быховский, Гавриленко и др., 2002; Пеков, Кононкова, 2010; Быховский, Архипова, 2016; Морозова, 2018) показал, что турмалины этого района практически не изучены. Ранее состав турмалинов из пегматитовой жилы г. Охмыльк изучался только методом спектрального анализа (Соседко, 1961). Исключение составляет оленит, впервые найденный здесь и исследованный достаточно детально (Соколов и др., 1986).

Результаты электронно-зондовых анализов турмалинов I, II и III, полученных в настоящей работе, приведены в табл. 2 и 3. Расчет формул выполнялся на сумму $Si + Ti = 6$ (Булах, 1967).

Турмалин I. В темноокрашенных турмалинах установлено в среднем (мас. %): SiO_2 36.01 ± 0.76 , TiO_2 0.01 ± 0.01 , Al_2O_3 37.40 ± 0.89 , FeO 9.56 ± 2.15 , MnO 1.06 ± 0.33 , CaO



Рис. 3. Пегматит кварц-олигоклазового состава с турмалином I из приконтактной зоны. Фотография шлифа. Размер изображения 1 см.

Fig. 3. Quartz-oligoclase pegmatite with tourmaline I from the contact zone. Photo of the thin section. The image size is 1 cm.



Рис. 4. Зональный кристалл турмалина I (1), окруженный кварц-альбитовым агрегатом с бледно-розовым турмалином (2). Фотография шлифа. Николи скрещены. Размер изображения 0.18 см.

Fig. 4. Zonal crystal of tourmaline I (1) surrounded by quartz-albite aggregate with pale pink tourmaline (2). Photo of the thin section. Cross polarized light. The image size is 0.18 cm.

0.02 ± 0.01 , MgO 0.01, Na₂O 1.94 ± 0.31 , Li₂O 0.29 ± 0.20 , K₂O 0.08 ± 0.05 , ZnO 0.03 ± 0.01 (табл. 2).

Исследование отдельных кристаллов турмалина I показало, что они зональные, и по содержанию отдельных компонентов центральные зоны кристалла отличаются от внешних его зон. Так, в центре кристалла установлено (мас. %): FeO 9.91, MnO 1.03,

Таблица 2. Химический состав турмалина I (мас. %) из пегматитовой жилы № 2
Table 2. Chemical composition of tourmaline I (wt %) from the pegmatite vein No 2

Компонент	Турмалин I, среднее содержание ($n = 21$)	Турмалин I, кристалл	
		центральная зона кристалла ($n = 5$)	внешняя зона кристалла
SiO ₂	36.01 ± 0.76	35.55	35.62
TiO ₂	0.01 ± 0.01	0.00	0.05
Al ₂ O ₃	37.40 ± 0.89	37.24	39.04
FeO	9.56 ± 2.15	9.91	6.47
MnO	1.06 ± 0.33	1.03	0.81
MgO	0.01 ± 0.00	0.00	0.06
CaO	0.02 ± 0.01	0.00	0.12
Li ₂ O*	0.29 ± 0.20	0.05	0.27
Na ₂ O	1.94 ± 0.31	2.16	1.41
K ₂ O	0.08 ± 0.05	0.00	0.18
ZnO	0.03 ± 0.01	0.00	0.24
Σ**	86.39 ± 0.91	86.45	84.79
Количество атомов в позиции (Z + Y), а. ф. и отношение Al/(Al + Fe) в позиции (Y)			
Al	7.34	7.41	7.74
Fe	1.34	1.40	0.91
Mn	0.15	0.15	0.12
Mg	0.00	0.00	0.02
Li*	0.17	0.04	0.18
Zn	0.00	0.00	0.03
Σ в позиции (Z + Y)	9.00	9.00	9.00
Al/(Al + Fe)	0.50	0.50	0.66
Количество атомов в позиции (X), а. ф., отношения Na/(Na + vac) и vac/(vac + Na + K)			
Ca	0.02	0.00	0.02
Na	0.61	0.80	0.46
K	0.02	0.00	0.04
Σ в позиции X	0.65	0.80	0.52
vac	0.35	0.20	0.48
Na/(Na + vac)	0.64	0.80	0.48
Содержание условных миналов, %			
Эльбаит	11.29	2.94	12.86
Шерл	44.41	46.63	30.35
Дравит	0.07	0.00	0.50
Тсилазит	4.99	4.91	3.85
Оленит	39.24	45.52	52.44
Σ	100.00	100.00	100.00
Параметры элементарной ячейки			
a (Å)	—	—	15.95
c (Å)	—	—	7.13

Примечание. Кристаллохимическая формула турмалина: $X_{0,1-1}Y_3Z_6(BO_3)_3(Si_6O_{18})(O,OH,F)_4$, где X – Na, Ca, K, vac (вакансия), Y – Mg, Fe²⁺, Mn, Zn, Li, Al, Z – Al. n – количество анализов. * Содержание Li в турмалине рассчитано по формуле: $3-\Sigma Y$ (Selway et al., 1999). Параметры элементарной ячейки определены под руководством Н.В. Платоновой. Прочерк – параметры не определялись. ** Сумма анализа дана без учета бор-а и H₂O.

Na₂O 2.16. Во внешней зоне содержания этих компонентов понижены (FeO 6.47 мас. %, MnO 0.81 мас. %, Na₂O 1.41 мас. %) или повышены (Li₂O до 0.27 мас. %), а также фиксируется появление в составе турмалина кальция, магния и цинка (CaO 0.12 мас. %, MgO 0.06 мас. %, ZnO 0.24 мас. %).

На основе химического состава турмалина I (табл. 2) выполнен перерасчет на условные миналы методом, предложенным П.Б. Соколовым (1985). Для исследован-

Таблица 3. Химический состав турмалина II (мас. %) из пегматитовой жилы № 2
Table 3. Chemical composition of tourmaline II (wt %) from the pegmatite vein No 2

Компонент	Турмалин II, ярко-розовый ($n = 30$)	Турмалин II, бледно-розовый ($n = 5$)	Оленит (Соколов и др., 1986)
SiO ₂	37.89 ± 0.88	38.80 ± 0.26	36.86
TiO ₂	0.00	0.00	0.03
Al ₂ O ₃	41.74 ± 0.26	40.70 ± 0.55	46.43
Fe ₂ O ₃	0.00	0.00	0.14
FeO	0.62 ± 0.28	1.58 ± 0.41	0.00
MnO	1.43 ± 0.39	0.38 ± 0.07	0.49
MgO	0.00	0.20 ± 0.02	0.00
CaO	0.35 ± 0.15	1.88 ± 0.45	0.26
Li ₂ O	1.33 ± 0.12*	1.78 ± 0.21*	0.00
Na ₂ O	2.02 ± 0.23	2.01 ± 0.34	1.60
K ₂ O	0.06 ± 0.01	0.04 ± 0.01	0.03
ZnO	0.00	0.06 ± 0.02	0.03
Σ	85.44**	85.63**	85.87
Количество атомов в позиции (Z + Y) и отношение Al/(Al + Fe) в позиции (Y)			
Al	7.79	7.42	8.91
Fe	0.07	0.20	0.02
Mn	0.19	0.05	0.07
Mg	0.00	0.05	0.00
Li*	0.95*	1.27*	0.00
Zn	0.00	0.01	0.00
Σ в позиции (Z + Y)	9.00	9.00	9.00
Al/(Al + Fe)	0.96	0.88	0.99
Количество атомов в позиции (X) и отношение Na/(Na + vac)			
Ca	0.08	0.31	0,05
Na	0.62	0.60	0,50
K	0.01	0.01	0,01
Σ	0.71	0.92	0.56
vac	0.29	0.08	0.44
Na/(Na + vac)	0.68	0.88	0.53
Содержание условных миналов, %			
Эльбаит	46.09	46.12	1.49
Шерл	0.65	7.33	0.00
Дравит	0.00	1.65	0.00
Тсилазит	6.01	1.79	2.25
Оленит	47.24	43.11	96.26
Σ	100.00	100.00	100.00
Параметры элементарной ячейки			
a (Å)	15.96	15.85	15.80
c (Å)	7.13	7.10	7.09

ного турмалина характерны высокие содержания оленитового минала (от 39 до 52%) во внешней зоне кристалла. Содержание шерлового минала изменяется от 46.6 до 30%. Самые низкие содержания эльбаитового минала установлены в центральном участке кристалла (2.9%).

Турмалин II и III. Анализ данных, полученных для образцов турмалина ярко- и бледно-розового цвета из жилы № 2, показал, что все они обладают достаточно однородным химическим составом (табл. 3).

В ярко-розовом турмалине II установлено (мас. %): SiO_2 37.89 ± 0.88 , Al_2O_3 41.74 ± 0.26 , MnO 1.43 ± 0.39 , FeO 0.62 ± 0.28 , CaO 0.35 ± 0.15 , Na_2O 2.02 ± 0.23 , Li_2O 1.33 ± 0.17 .

Турмалин III бледно-розовый из кварц-альбит-турмалинового агрегата по составу похож на выше описанный ярко-розовый, но отличается от него заметно большим содержанием оксидов CaO (1.88 ± 0.45 мас. %), FeO (1.58 ± 0.41 мас. %), Li_2O (1.78 ± 0.21 мас. %), MgO (0.20 ± 0.02 мас. %) и значительно меньшим – MnO (0.38 ± 0.07 мас. %).

Для турмалинов II и III характерно высокие содержания оленитового минала в ярко-розовом (47%) и в бледно-розовом турмалине (43%).

В табл. 2 и 3 приведены также параметры элементарной ячейки турмалина I (внешняя зона кристалла) и турмалинов II и III – ярко-розового и бледно-розового. Параметры a и c темноокрашенного и ярко-розового турмалинов практически не различаются и соответственно равны (Å): у турмалина I 15.95 и 7.13, у ярко-розового 15.96 и 7.13, у бледно-розового 15.85 и 7.10.

Бледно-розовый эльбаит характеризуется пониженными значениями этих параметров, но они по величине несколько выше тех значений, которые установлены для оленита (Å): 15.803 и 7.086 (Соколов и др., 1986).

Помимо макрокомпонентов, в турмалинах были определены содержания элементов-примесей. Как видно в табл. 4, наибольшее количество редких элементов (РЭ) установлено во внешней зоне кристалла турмалина I (2372 г/т). В центральной его зоне их содержание заметно меньше (1180 г/т). Еще ниже концентрация РЭ в ярко-розовом турмалине (578 г/т).

Внешняя зона темноокрашенного кристалла турмалина обогащена такими элементами, как никель (1150 г/т), кобальт (851 г/т) и галлий (218 г/т) и обеднена Cr (в 4 раза), V (в 3 раза), Sc (в 2 раза). Концентрации Nb, W, Cu также существенно ниже. Исключением является тантал, содержание которого практически стабильно и не превышает примерно 8 г/т (табл. 4).

Для турмалина II характерны низкие содержания никеля, кобальта, но заметно более высокие концентрации галлия (416 г/т). Количества ниобия и тантала в нем существенно ниже, чем в турмалине I (в 2–5 раз меньше Nb и в 2 раза меньше Ta).

Анализ содержания редкоземельных элементов (РЗЭ) в кристалле турмалина I показал, что их суммарное количество уменьшается от его центральной зоны (54 г/т) к внешней зоне (14 г/т). Такое же поведение РЗЭ отмечено С.Г. Скубловым (2005) для зональных кристаллов биотита, амфибола и пироксена.

В ярко-розовом турмалине установлена наименьшая концентрация РЗЭ (6.7 г/т).

Содержания РЗЭ в турмалинах были нормированы относительно их содержаний в углистых хондритах (Gordienko et al., 2012) (табл. 5). Были рассчитаны отношения Ce/La , La/Yb , Yb/Sm , служащие индикаторами условий кристаллизации (Скублов, 2005; Резникова и др., 2010; Морозова, 2018).

В кристалле турмалина I от центра к краям Ce/La отношение увеличивается от 1.7 до 2.1. Для турмалина II это отношение равно 2.4. По мнению некоторых исследователей (Резникова и др., 2010), данное отношение может служить индикатором условий формирования минерала. Величина $\text{Ce/La} > 2$ указывает на участие в образовании минерала высокотемпературных растворов.

La/Yb отношение в центре кристалла турмалина I равно 11.8 и уменьшается до 3.6 во внешней зоне. Наименьшая величина этого отношения (2.4) характерна для турмалина II. Как известно (Скублов, 2005), La/Yb отношение является мерой относительного обогащения минерала легкими лантаноидами относительно тяжелых.

Величина Yb/Sm отношения в турмалине I изменяется от 0.37 (центральная зона) до 0.58 (внешняя зона). В турмалине II оно равно 1.00. Возрастание отношения Yb/Sm может быть обусловлено влиянием постмагматических процессов (Резникова и др., 2010).

Таблица 4. Содержания элементов-примесей (г/т) в турмалине из жилы № 2
Table 4. Contents of trace elements (ppm) in tourmaline from vein No 2

Элементы	Шерл, центральная зона кристалла	Шерл, внешняя зона кристалла	Эльбаит
Ni	116	1150	15
Co	27	851	3.3
Sc	28	14	2.9
V	193	64	5
Cr	204	5.5	6.7
W	6	1.37	0.96
Nb	21	7.2	4.2
Ta	8.7	8.3	4.72
Cu	144	38	26
Ga	61	218	416
Sn	44	—	87
Sr	112	—	—
Th	5.8	—	—
U	7.1	—	—
Bi	45	—	—
Pb	51	—	—
Zr	52	—	—
Hf	1.9	—	—
Mo	7	—	—
La	10	1.47	0.62
Ce	17	3.14	1.47
Pr	2.08	0.44	0.17
Nd	8.75	1.86	0.87
Sm	2.27	0.71	0.26
Eu	0.682	0.166	0.059
Gd	2.22	0.79	0.33
Tb	0.34	0.19	0.06
Dy	1.77	0.98	0.39
Ho	0.3	0.15	0.08
Er	0.84	0.37	0.25
Tm	0.12	0.079	0.038
Yb	0.85	0.41	0.26
Lu	0.14	0.073	0.04
Y	6.8	3.6	1.8
Σ РЗЭ	54	14	7
Σ ЭП	1189	2372	578

Примечание. Прочерк – содержание элемента ниже порога чувствительности.

Таблица 5. Содержания РЗЭ в турмалине, нормированные к хондриту, и отношения Ce/La, La/Yb, Yb/Sm
Table 5. Contents of rare earth elements in tourmaline, normalized to chondrite, and the ratios Ce/La, La/Yb, Yb/Sm

Элементы	Содержания РЗЭ, нормированные к хондриту		
	Шерл, центральная зона кристалла	Шерл, внешняя зона кристалла	Эльбаит
La	31.06	4.57	1.93
Ce	20.36	3.76	1.76
Pr	15.18	3.21	1.24
Nd	14.51	3.08	1.44
Sm	11.58	3.62	1.33
Eu	8.27	2.01	0.72
Gd	8.22	2.93	1.22
Tb	6.30	3.52	1.11
Dy	5.35	2.96	1.18
Ho	3.68	1.84	0.98
Er	3.72	1.64	1.11
Tm	3.37	2.22	1.07
Yb	3.65	1.76	1.12
Lu	3.87	2.02	1.10
Y	4.53	2.40	1.20
Σ	143.65	41.54	18.51
Ce/La	1.7	2.1	2.4
La/Yb	11.76	3.59	2.38
Yb/Sm	0.37	0.58	1.00

На редкоземельном спектре (рис. 5), построенном для центральной зоны кристалла турмалина I, наблюдается очень слабая отрицательная Eu аномалия. Кривые распределения РЗЭ для внешней зоны кристалла уже демонстрируют подобную аномалию. В распределении РЗЭ для внешней зоны отчетливо проявлен тетрадный эффект между Gd и Tb с выпуклым профилем РЗЭ. Проявление такого эффекта в минералах является следствием их формирования при участии высокотемпературных постмагматических растворов, обогащенных флюидной фазой (Скублов, 2005).

Аналогичный характер распределения РЗЭ установлен в целом для альбит-сподуменовых пегматитов (Морозова, 2018).

ВКЛЮЧЕНИЯ В ТУРМАЛИНЕ

Микроскопические исследования турмалинов в двусторонне полированных пластинках показали, что в турмалине I и, главным образом, в турмалине II присутствуют многочисленные в основном минеральные и довольно мелкие флюидные включения.

По данным исследований, проведенных с помощью электронного сканирующего микроскопа SEM-501, электронного микроскопа Hitachi TM 3000 и Quanta 3D, а также рамановской спектроскопии, в турмалинах установлены включения магнетита,

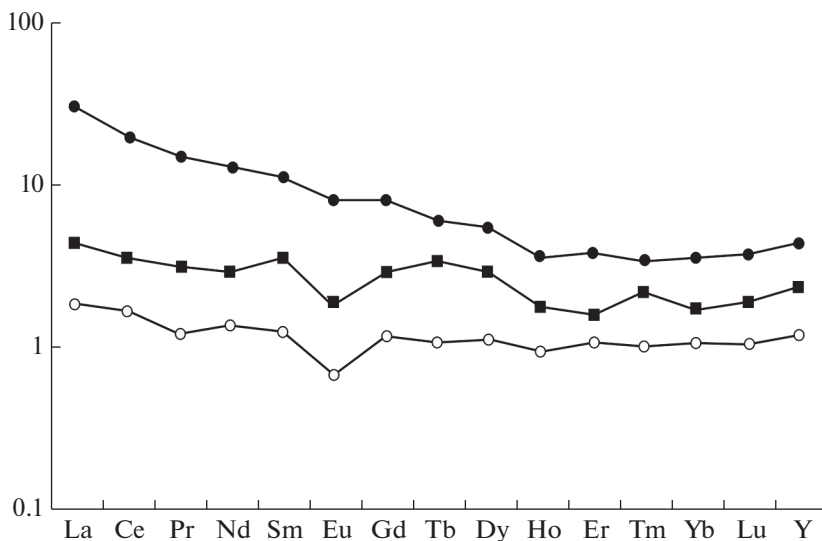


Рис. 5. Графики распределения РЗЭ в кристаллах турмалина. Черные кружки – центральная зона кристалла турмалина I, черные квадратики – краевая зона кристалла турмалина I, белые кружки – турмалин II.

Fig. 5. REE distribution in tourmalines. Black circles – core of crystal of tourmaline I, black squares – rim of crystal of tourmaline I, white circles – tourmaline I.

танталита, касситерита, микролита, симпсонита, циркона, поллуцита, монтебразита, апатита, мусковита, альбита, биотита. Следует отметить, что в турмалине I наблюдаются в основном биотит и магнетит, а остальные перечисленные включения характерны для турмалина II.

На рис. 6 приведены фотографии наиболее типичных включений в турмалине. Кристалл магнетита (рис. 6, *a*), установленный в турмалине I, очень неоднороден, что подтверждается при исследовании с помощью электронного сканирующего микроскопа SEM-501. Магнетит содержит примеси висмута, мышьяка и свинца. В кристалле турмалина II наиболее часто встречаются танталит и касситерит. Иногда видны сростки их зерен (рис. 6, *б, в*).

Состав включений танталита (мас. %): UO_2 до 10.3, Nb_2O_5 до 11.6, PbO до 5.9, в небольших количествах встречаются примеси марганца и олова. В минеральных включениях, содержащих повышенные количества урана, практически отсутствует каль-

Рис. 6. Включения в турмалине I (*a* – кристалл магнетита) и турмалине II (*б, в* – зерна танталита и касситерита, *г* – зерна танталита червеобразной формы, *д* – сросток зерен танталита, *е* – зерно танталита неправильной формы, *ж* – кристалл танталита с каймой симпсонита. 1, 2, 3 – участки кристалла серого, темно-серого и светло-серого цвета, пояснения в тексте, *з* – рамановский спектр танталита: 1 – синяя линия – спектр турмалина II, черная линия – спектр турмалина II и танталита, 2 – спектр танталита). Mgt – магнетит, Tant – танталит, Kas – касситерит.

Fig. 6. Inclusions in tourmaline I (*a* – magnetite) and tourmaline II (*б, в* – tantalite and cassiterite grains, *г* – worm-shaped tantalite grains, *д* – tantalite intergrowth, *е* – irregular shaped tantalite grains, *ж* – tantalite crystal with the simpsonite border. 1, 2, 3 – sections of gray, dark gray, and light gray crystal colors, explanations in the text, *з* – Raman spectrum of tantalite: 1 – blue line, spectrum of tourmaline II, black line, spectrum of tourmaline II and tantalite, 2 – spectrum of tantalite). Mgt – magnetite, Tant – tantalite, Kas – cassiterite.

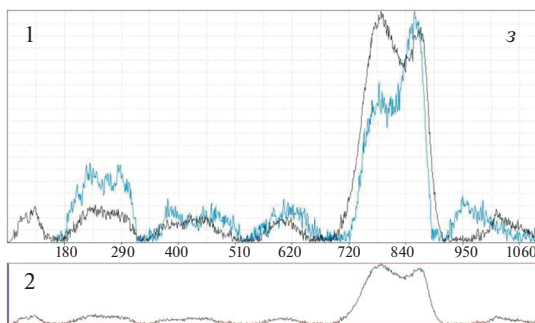
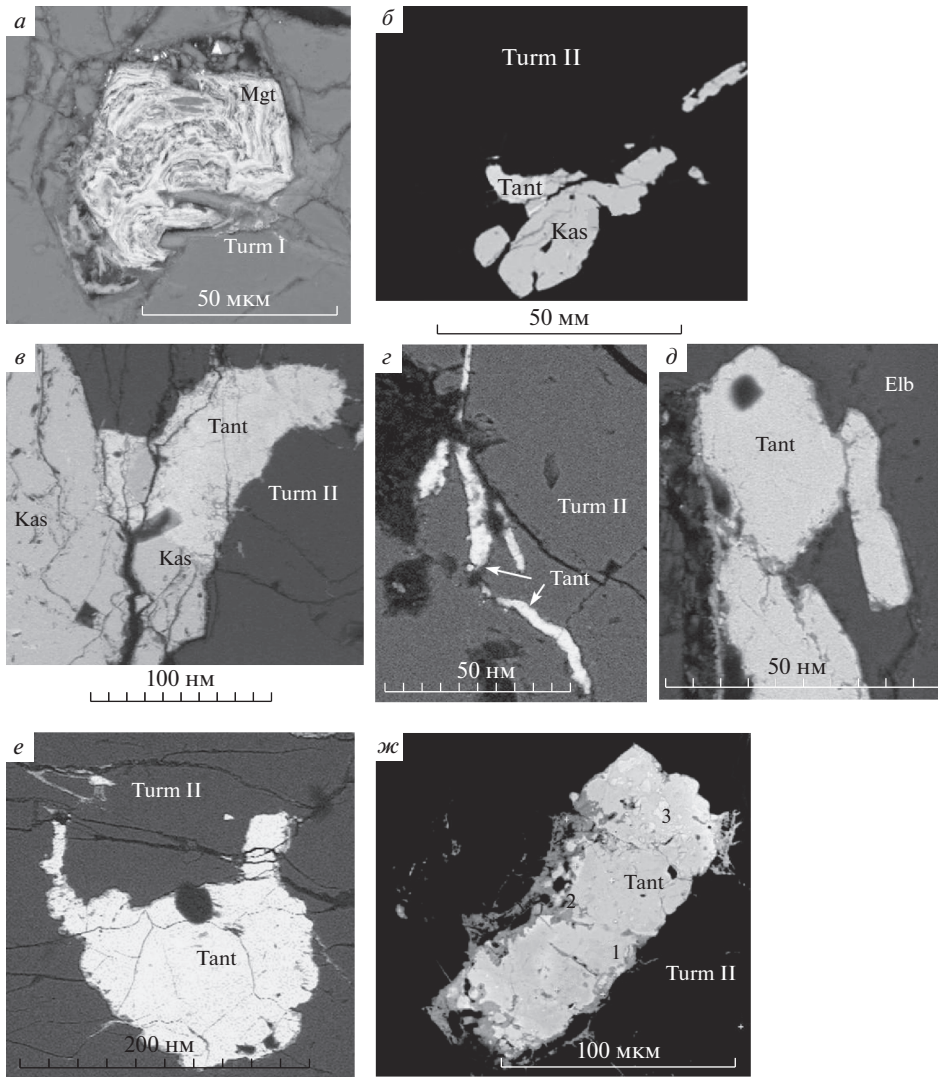


Таблица 6. Состав отдельных участков (мас. %) включения в турмалине (рис. 6, ж)
Table 6. Composition of individual sites (wt %) of the inclusion in tourmaline (Fig. 6, ж)

Цвет участка кристалла и номер точки анализа	O	Al	Nb	U	K	Na	Ca	Ba	Mn	Fe	Pb	Ta	P	Сумма
Серый, точка 1	19.73	0.51	3.97	7.89	0.23	—	4.38	—	0.50	0.47	0	62.33	—	100
Темно-серый, точка 2	24.78	3.52	1.88	2.86	—	0.65	0.62	—	—	2.62	8.97	52.38	1.72	100
Светлый, точка 3	17.20	—	—	4.85	0.14	—	7.20	5.04	—	—	27.81	37.77	—	100

ций, поэтому они не могут быть отнесены к микролиту, но, возможно, являются разновидностью уранмикролита, характерного для жилы № 2 (Соседко, 1961).

Как показало изучение включений, содержащих преимущественно тантал, они в отраженных электронах имеют, как правило, причудливые формы с неровными, извилистыми границами и ответвлениями (рис. 6, е). Состав этих зерен неоднороден. Центральные части включений содержат примеси Nb, Mn, Hf. По границе с минералом-хозяином развита оторочка серого или светло-коричневого цвета, в состав которой входят только тантал и ниобий, что соответствует симпсониту, также характерному минералу пегматитовой жилы № 2 (Соседко, 1961).

Для описанных включений с помощью рамановской спектроскопии получен спектр танталита (рис. 6, з).

На микроанализаторе Quanta 3D подобное включение было изучено в участках, различающихся в отраженных электронах по цвету: серому, темно-серому и светло-серому. Составы этих участков различаются содержанию Ta (табл. 6). Для серого участка (рис. 6, ж, точка 1) установлено наиболее высокое содержание Ta (62.3 мас. %). Здесь же определены Nb (4.0 мас. %), U (7.9 мас. %) и Mn (0.5 мас. %). На участке темно-серого цвета (рис. 6, ж, точка 2) содержание Ta заметно ниже (52.4 мас. %). Содержания других элементов (мас. %): Nb 1.9, Pb 9.0, Fe 2.6, U 2.9. На светло-сером участке (рис. 6, ж, точка 3) содержание Ta наименьшее (37.8 мас. %), но здесь в значительно большем количестве отмечены (мас. %): Pb 27.81, U 4.85, Ca 7.20 и Ba 5.04. Приведенные данные позволяют предположить, что состав включения варьирует от танталита до уранмикролита.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследованные турмалины из сподуменовых пегматитов жилы № 2 г. Охмыльк были сопоставлены с турмалинами из различных пегматитовых жил. Были рассчитаны величины атомных отношений $Na/(Na + vac)$ и $Al/(Al + Fe)$, приведенные в табл. 2, 3, 7, 8, и построена диаграмма шерл—фоитит—россманит—эльбаит (рис. 7).

Сравнение состава темноокрашенных турмалинов из различных сподуменовых пегматитов показало, что содержание алюминия в них колеблется в интервале 6.56–7.47 а. ф. При этом наибольшее его количество (7.47 а. ф.) установлено в турмалинах из жил Тургеневско-Митрофановского пегматитового поля и в турмалине I из жилы № 2 г. Охмыльк. Наименьшие количества Al характерны для темноокрашенного турмалина из сподуменовых пегматитов Восточной Сибири (6.56 а. ф.), для черного турмалина из месторождений Добра Вода Чехии (6.71 а. ф.) и Малхан (6.78 а. ф.). Несколько больше Al в турмалине месторождения Рожна Чехии (6.81 а. ф.).

Турмалин I из жилы № 2 г. Охмыльк характеризуется наименьшими концентрациями магния (0.01 мас. % MgO). Такое же количество MgO установлено в турмалине из месторождения Рожна Чехии. Наибольшие содержания магния – в черном турмалине Восточной Сибири (1.00% MgO).

Таблица 7. Составы темноокрашенных турмалинов (мас. %) из различных редкометальных пегматитов**Table 7.** Compositions of dark-colored tourmalines (wt %) from various rare -metal pegmatites

Компонент	1	2	3	4	5	6	10
SiO ₂	36.01	35.38	35.74	35.59	36.32	35.80	33.56
TiO ₂	0.01	0.46	0.22	0.26	0.16	0.00	0.07
Al ₂ O ₃	37.40	34.00	33.29	37.84	34.26	34.70	43.44
Fe ₂ O ₃	0.00	1.26	2.22	0.00	0.00	0.00	0.00
FeO	9.56	11.30	12.39	9.66	11.12	13.80	5.70
MnO	1.06	1.51	0.22	0.27	0.22	0.44	0.38
MgO	0.01	0.15	1.00	0.42	0.12	0.02	0.40
CaO	0.02	0.15	0.02	0.23	0.00	0.00	0.69
Li ₂ O	0.29	0.07	0.04	0.08	1.00	0.27	0.00
Na ₂ O	1.94	2.00	1.85	1.59	2.43	1.24	1.63
K ₂ O	0.08	0.25	0.10	0.00	0.00	0.00	0.03
ZnO	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12	0.00
Σ	86.39	86.53	87.09	85.94	85.63	86.24	85.90
Количество атомов в позиции (Z + Y) и отношение Al/(Al + Fe) в позиции (Y)							
Al	7.34	6.78	6.56	7.47	6.71	6.81	8.06
Fe	1.34	1.85	2.13	1.35	1.54	1.93	0.79
Mn	0.15	0.23	0.03	0.03	0.03	0.06	0.05
Mg	0.00	0.04	0.03	0.10	0.03	0.00	0.10
Li	0.17	0.06	0.25	0.05	0.67	0.18	0.00
Zn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00
Σ	9.00	8.95	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00
Al/(Al + Fe)	0.50	0.30	0.21	0.52	0.32	0.30	0.72
Количество атомов в позиции (X) и отношение Na/(Na + vac)							
Ca	0.02	0.03	0.01	0.04	0.00	0.00	0.12
Na	0.61	0.66	0.60	0.52	0.78	0.40	0.53
K	0.02	0.05	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01
Σ	0.65	0.74	0.63	0.56	0.78	0.40	0.66
vac	0.35	0.26	0.37	0.44	0.22	0.60	0.34
Na/(Na + vac)	0.64	0.72	0.62	0.54	0.78	0.40	0.61
Миналы	Содержания условных миналов в турмалине, %						
	1	2	3	4	5	6	10
Эльбаит	11.29	12.67	33.00	2.00	44.67	12.67	0.43
Шерл	44.41	61.33	57.67	45.00	51.33	64.33	26.33
Дравит	0.07	1.33	8.33	3.33	0.98	0.00	3.33
Тсилаизит	4.99	7.33	1.00	1.00	1.02	2.00	1.67
Олениг	39.24	17.33	—	48.67	1.99	21.00	68.24
Σ	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Примечание. Цифрами обозначены месторождения: 1 – жила № 2 Вороньей тундры; 2 – пегматиты Малханского пегматитового поля, Центральное Забайкалье (Загорский, Перетяжко, 1992); 3 – сподуменовые пегматиты Восточной Сибири (Гранитные пегматиты, 1997); 4 – сподуменовые пегматиты Тургеневско-Митрофановского пегматитового поля. Приморье; 5 – месторождение Добра Вода, Чехия (Selway et al., 1999); 6 – месторождение Рожна, Чехия (Selway et al., 1999); 10 – олениг-шерл из пегматитов Кутна Гора, Чехия (Semprerek et al., 2006).

Таблица 8. Состав ярко- и бледно-розового турмалинов (мас. %) из различных редкометалльных пегматитов**Table 8.** Compositions of bright and pale-pink tourmalines (wt %) from various rare -metal pegmatites

Компонент	1	1б	2	2б	3	4	4б	5	6б	7	7б	8
SiO ₂	37.89	38.80	38.60	37.63	39.03	38.42	38.15	39.11	38.16	37.94	38.32	38.10
TiO ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00
Al ₂ O ₃	41.74	40.70	40.52	40.40	41.07	42.45	43.61	41.28	40.77	42.9	44.42	40.60
Fe ₂ O ₃	0.00	0.00	0.33	0.10	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FeO	0.62	1.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.28	0.09	0.10	0.60
MnO	1.43	0.38	0.22	0.29	0.80	0.13	0.06	0.15	1.27	0.32	0.01	1.40
MgO	0.00	0.20	0.06	0.10	0.11	0.35	0.33	0.00	0.00	0.4	0.3	0.00
CaO	0.35	1.88	1.50	1.50	0.57	0.64	0.31	0.00	0.23	0.44	0.36	0.60
Li ₂ O	1.33*	1.78*	1.99	1.97	1.94	1.78	1.15	1.97	1.74	1.10	1.12	1.78
Na ₂ O	2.02	2.01	1.60	2.07	2.01	1.37	1.54	1.72	2.03	1.93	1.56	1.60
K ₂ O	0.06	0.04	0.20	0.14	0.15	0.06	0.04	0.00	0.00	0.01	0.31	0.00
ZnO	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Σ	85.44**	85.63**	85.02	85.54	85.	85.20	84.58	84.52	84.48	85.13	86.52	84.68
Количество атомов в позиции (Z + Y) и отношение Al/(Al + Fe) в позиции (Y)												
Al	7.79	7.42	7.50	7.52	7.45	7.81	8.09	7.57	7.56	8.06	8.20	7.54
Fe	0.07	0.20	0.04	0.02	0.03	0.00	0.00	0.00	0.03	0.01	0.02	0.08
Mn	0.19	0.05	0.03	0.03	0.11	0.01	0.01	0.02	0.16	0.06	0.00	0.19
Mg	0.00	0.05	0.01	0.02	0.02	0.06	0.08	0.00	0.00	0.10	0.07	0.00
Li	0.95*	1.27*	1.42	1.41	1.39	1.12	0.82	1.41	1.25	0.77	0.71	1.19
Zn	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Σ	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00
Al/(Al + Fe)	0.96	0.88	0.97	0.99	0.98	1.00	1.00	1.00	0.98	1.00	0.99	0.95
Количество атомов в позиции (X) и отношение Na/(Na + vac)												
Ca	0.08	0.31	0.25	0.36	0.09	0.11	0.05	0.00	0.04	0.07	0.06	0.10
Na	0.62	0.60	0.49	0.61	0.55	0.41	0.47	0.52	0.62	0.59	0.47	0.49
K	0.01	0.01	0.04	0.03	0.03	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00
Σ	0.71	0.92	0.78	1.00	0.67	0.53	0.53	0.52	0.66	0.66	0.59	0.59
vac	0.29	0.08	0.22	0.00	0.33	0.47	0.47	0.48	0.34	0.34	0.41	0.41
Na/(Na + vac)	0.68	0.88	0.69	1.00	0.63	0.47	0.50	0.52	0.65	0.63	0.53	0.54
Содержания условных миналов в турмалине, %												
Эльбаит	46.09	46.12	97.33	95.33	94.88	72.58	55.18	94.00	82.24	56.68	47.65	79.16
Шерл	0.65	7.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.23	0.40	0.44	3.00
Дравит	0.00	1.65	0.33	0.67	0.83	2.71	2.58	0.00	0.00	3.14	2.33	0.00
Тсилазит	6.01	1.79	1.00	1.00	3.50	0.57	0.27	0.67	5.64	1.43	0.04	6.22
Оленин	47.24	43.11	1.33	3.00	0.78	24.14	41.98	5.33	10.89	38.35	49.53	11.62
Σ	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Примечание. Номер с буквой б – бледно-розовый эльбаит. Цифры соответствуют месторождениям эльбаита, приведенным на диаграммах (рис. 7, 8): 1 – жила № 2 Вороньей тундры, Кольский полуостров; 2 – пегматиты Малханского пегматитового поля, Центральное Забайкалье (Загорский, Перетяжко, 1992); 3 – сподуменовые пегматиты Восточной Сибири (Гранитные пегматиты, 1997); 4 – сподуменовые пегматиты Тургеневско-Митрофановского пегматитового поля, Приморье (данные авторов); 5 – месторождение Добра Вода, Чехия (Selway et al., 1999); 6 – месторождение Рожна, Чехия (Selway et al., 1999); 7 – Боршевоцкий кряж (Восточное Забайкалье) (Минералы, 1981); 8 – пегматиты Манитоба, Канада (Teertstra et al., 1999).

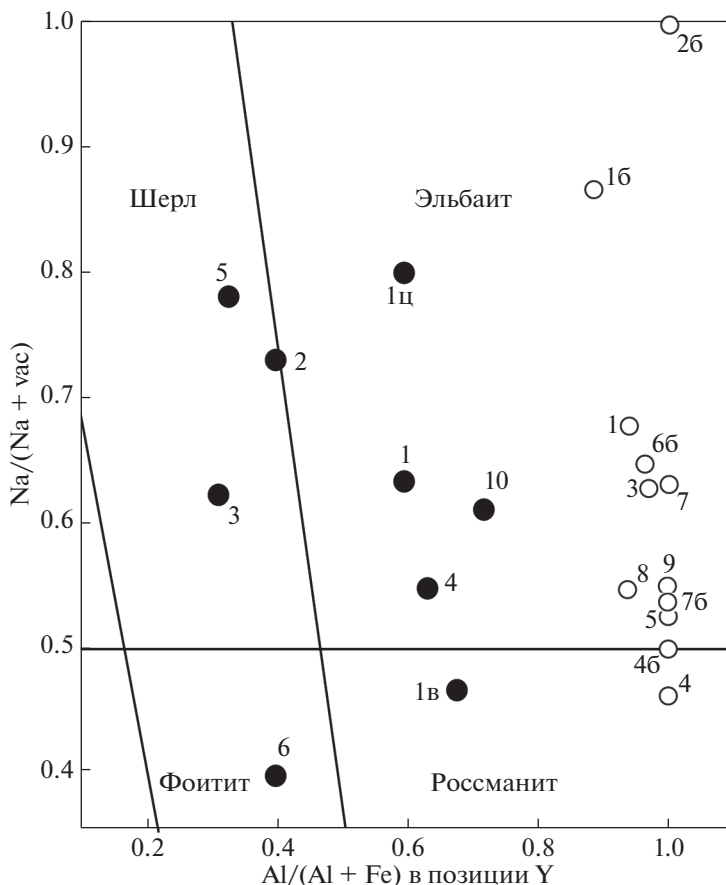


Рис. 7. Распределение точек, отвечающих составам турмалинов из различных редкометалльных пегматитов на диаграмме Дж.Б. Сэлвея и соавторов (Selway et al., 1999). Величины атомных отношений приведены в табл. 2, 3, 7, 8.

Темные кружки – темноокрашенный турмалин, светлые кружки – розовый турмалин (если номер кружка без индекса б – ярко-розовый, если с индексом б – бледно-розовый турмалин). Числа около кружков соответствуют месторождениям: 1 – жила № 2, Воронья тундра, Кольский полуостров (1ц – центральная зона кристалла, 1в – внешняя зоны кристалла); 2 – пегматиты Малханского пегматитового поля, Центральное Забайкалье (Загорский, Перетьяжко, 1992); 3 – сподуменовые пегматиты Восточной Сибири (Гранитные пегматиты, 1997); 4 – сподуменовые пегматиты Тургеневско-Митрофановского пегматитового поля, Приморье; 5 – месторождение Добра Вода, Чехия (Selway et al., 1999); 6 – месторождение Рожна, Чехия (Selway et al., 1999); 7 – Боршевоchnый край, Восточное Забайкалье (Минералы, 1981); 8 – пегматиты Манитоба, Канада (Teertstra et al., 1999); 9 – оленит, Воронья тундра, Кольский полуостров (Соколов и др., 1986); 10 – оленит-шерл из пегматитов Кутна Гора, Чехия (Cempirek et al., 2006).

Fig. 7. Distribution of compositions of tourmalines from various rare-metal pegmatites on the plot of Selway et al., 1999. The values of the atomic ratios are given in tables 2, 3, 7, 8. vac – vacancy. Black circles are dark-colored tourmaline, white circles are pink tourmaline (number of circles without index б, bright-pink; with index б, pale pink). 1 – vein No. 2, Voronya Tundra, Kola Peninsula (1ц, crystal core; 1в, rim); 2 – pegmatites of the Malkhan pegmatite field, Central Transbaikalia (Zagorsky, Peretyazhko, 1992); 3 – spodumene pegmatites of Eastern Siberia (Granite pegmatites, 1997); 4 – spodumene pegmatites of the Turgenev–Mitrofanov pegmatite field, Primorye; 5 – Dobra Voda deposit, Czech Republic (Selway et al., 1999); 6 – Rozhna deposit, Czech Republic (Selway et al., 1999); 7 – Borshevochny ridge (Eastern Transbaikalia) (Minerals, 1981); 8 – pegmatites of Manitoba, Canada (Teertstra et al., 1999); 9 – olenite, Raven tundra, Kola Peninsula; (Sokolov et al., 1986); 10 – olenite-shorl from Kutna Hora pegmatites, Czech Republic (Cempirek et al., 2006).

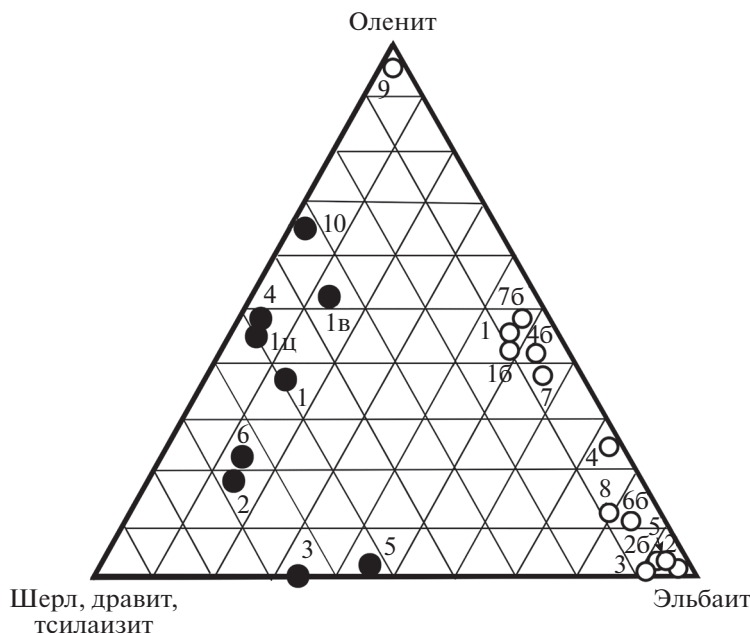


Рис. 8. Составы турмалинов из различных редкометальных пегматитов (табл. 2, 3, 7, 8). Условные обозначения см. рис. 7.

Fig. 8. Compositions of tourmalines from various rare-metal pegmatites (Tables 2, 3, 7, 8).

Содержание марганца в сравниваемых турмалинах варьирует от 0.22 до 1.51 мас. % MnO, при этом наибольшее количество этого компонента установлено в турмалине из пегматитов Малхан и в турмалине I из жилы № 2 г. Охмыльк.

Практически все сравниваемые турмалины отличаются низкими концентрациями кальция (≤ 0.02 мас. % CaO) и только темноокрашенный турмалин пегматитов Тургеневско-Митрофановского пегматитового поля содержит повышенные количества этого компонента (0.23 мас. % CaO).

Турмалин I из жилы № 2 г. Охмыльк, также как и турмалин из месторождения Рожна Чехии, характеризуется присутствием цинка (Соколов и др., 1988).

Для темноокрашенного турмалина I атомные отношения $Na/(Na + vac)$ и $Al/(Al + Fe)$ в среднем равны 0.64 и 0.50 соответственно. При переходе от центральной к внешней зоне кристалла турмалина отношение $Al/(Al + Fe)$ в меняется от 0.50 до 0.66, отношение $Na/(Na + vac)$ — от 0.80 до 0.48. На рис. 7 точки, отвечающие среднему составу турмалина I (точка 1), а также составу центральной зоны (1ц) изученного кристалла располагаются в поле эльбаита, вблизи границы раздела шерл—эльбаит. Точка, соответствующая составу внешней зоны кристалла (1в) лежит в поле россманита, вблизи линии раздела фойтит—россманит. Следовательно, турмалин, слагающий внешнюю зону кристалла, можно назвать фойтит-россманитом.

Фигуративные точки турмалинов из месторождений Восточной Сибири и Добра Вода Чехии на диаграмме шерл—фойтит—россманит—эльбаит лежат в поле шерла (рис. 7, точки 3 и 5).

К шерлу-эльбаиту относятся турмалины из пегматитовых жил Малханского пегматитового поля Центрального Забайкалья (рис. 7, точка 3) и Тургеневско-Митрофанов-

ского пегматитового поля Приморья (рис. 7, точка 4). Черный турмалин из месторождения Рожна Чехии является фойтитом (рис. 7, точка 6).

На диаграмме шерл–фойтит–россманит–эльбаит никак не отражаются вариации содержания оленитового минала. Для того, чтобы сравнить турмалины по содержанию оленитового компонента, их химический состав был пересчитан на условные миналы по методу П.Б Соколова (1985). Полученные результаты представлены в табл. 2, 7 и на треугольной диаграмме эльбаит–оленит–(шерл + дравит + тсилазит) (рис. 8).

Для турмалина I из жилы № 2 г. Охмыльк характерны высокие содержания оленитового минала (от 39 до 52%). Его содержание растет во внешней зоне кристалла (табл. 2 и рис. 7, точки 1, 1ц и 1в). На тройной диаграмме рядом с точками турмалина I располагаются точки 4 (пегматиты Тургеневско-Митрофановского пегматитового поля Приморья) и 10 (Кутна Гора). Ниже находятся точки 2 (пегматиты Малханского пегматитового поля) и 5 (месторождение Добра Вода). Шерл из пегматитов Восточной Сибири не содержит оленитового минала.

Таким образом, турмалин I, турмалин 1ц и черный турмалин из пегматитов Тургеневско-Митрофановского пегматитового поля Приморья можно называть шерл–оленитом, как это предложено в работе (Selway et al., 1999), а турмалин 1в – оленит–шерлом. Черные турмалины месторождений Малханского пегматитового поля и Рожна Чехии могут быть отнесены к шерл–эльбаиту (рис. 8, точки 2, 6).

Сопоставление составов ярко- и бледно-розовых турмалинов II и III из жилы № 2 г. Охмыльк и других редкометалльных пегматитов (табл. 3, 8) показало, что все сравниваемые турмалины характеризуются высокими концентрациями Al (7.42–8.20 а. ф.), при этом наибольшие его количества установлены в бледно-розовом турмалине Борщевочного кряжа Восточного Забайкалья (Минералы, 1981), а наименьшие – в бледно-розовом эльбаите жилы № 2 г. Охмыльк.

Количество Na в приведенных турмалинах варьирует от 0.41 до 0.62 а. ф., при этом повышенные содержания Na характерны для турмалинов II и III из жилы № 2 г. Охмыльк, для бледно-розового турмалина из пегматитов Малхан и Рожна Чехии, пониженные – для турмалинов из пегматитов Тургеневско-Митрофановского пегматитового поля Приморья и Борщевочного кряжа.

В бледно-розовых турмалинах из жилы № 2 г. Охмыльк и из пегматитов Малхан заметно выше содержание кальция. Поскольку его количество не превышает 0.36 а. ф., то, согласно работам М. Новака и соавторов (Novák et al., 2009) и Дж.Б. Селвея и соавторов (Selway et al., 1999), этот турмалин не является лиддикоатитом, но может быть отнесен к эльбаиту.

Для определения минерального вида ярко- и бледно-розового турмалина нами была использована, так же, как и для турмалина I, диаграмма шерл–фойтит–россманит–эльбаит (табл. 3, 8, рис. 7). Отношения $Na/(Na + vac)$ и $Al/(Al + Fe)$ для ярко-розового турмалина равны 0.68 и 0.96, для бледно-розового турмалина – 0.88 и 0.88 соответственно. На диаграмме (рис. 7) точки состава ярко-розового (1) и бледно-розового турмалина (1б), попадают в поле эльбаита. В это же поле попадает большинство других фигуративных точек. Они образуют узкую область, вытянутую параллельно вертикальной оси, в интервале 0.98–1.00 по оси $Al/(Al + Fe)$. Исключением являются ярко- и бледно-розовые турмалины из пегматитов Тургеневско-Митрофановского пегматитового поля, расположенные в поле россманита, на границе с эльбаитом. Их можно причислить к ряду эльбаит–россманит. Наиболее высокое отношение $Na/(Na + vac)$ равное 1.00 характерно для бледно-розового турмалина из пегматитов Малхан.

Отчетливые различия между турмалинами проявляются при пересчете на миналы. Ярко-розовый и бледно-розовый эльбаит из жилы № 2 Вороньей тундры не различаются по содержанию эльбаитового минала. Содержание оленитового минала в них со-

ставляет 47 и 43% соответственно. Наиболее заметные различия в составе ярко-розового и бледно-розового эльбаита установлены для сподуменовых пегматитов Тургеневско-Митрофановского пегматитового поля (72.6 и 55% эльбаитового минала, 24 и 42% оленитового минала). Повышенные содержания оленитового минала в ярко-розовом и бледно-розовом эльбаите характерны и для турмалинов Борщевочного кряжа Восточного Забайкалья (38 и 49.5%). По-видимому, турмалины из перечисленных пегматитовых месторождений следует относить к ряду эльбаит–оленит (Selway et al., 1999). Эльбаит из остальных рассмотренных месторождений характеризуется высоким содержанием эльбаитового минала (79–95%), при этом наименьшим содержанием данного минала отличается турмалин из пегматитов Манитобы, Канады, наибольшим – бледно-розовый эльбаит из пегматитов Малхан.

На тройной диаграмме (рис. 8) точка, соответствующая олениту, располагается обособленно, вблизи вершины оленитового минала.

Сопоставление темноокрашенных, ярко- и бледно-розовых турмалинов из сподуменовых пегматитов района Воронья тундра с турмалинами из других редкометальных пегматитов показало, что: (1) шерл–оленит из жилы № 2 г. Охмыльк по содержанию оленитового минала наиболее близок к турмалину из редкометальных сподуменовых пегматитов Тургеневско-Митрофановского пегматитового поля Приморья; (2) оленит–шерл из внешней зоны кристалла турмалина I близок по содержанию оленитового компонента турмалину из пегматитов Кутна Гора в Чехии; (3) эльбаит–оленит из жилы № 2 г. Охмыльк хорошо сопоставим с бледно-розовым турмалином из редкометальных сподуменовых пегматитов Тургеневско-Митрофановского пегматитового поля Приморья и эльбаитом из пегматитов Борщевочного кряжа Восточного Забайкалья.

Для исследованных турмалинов характерна последовательная смена шерла шерлом–оленитом, эльбаитом–оленитом и далее оленитом–эльбаитом. Аналогичная последовательность приведена в работе Дж. Б. Селвея и соавторов (Selway et al., 1999) для редкометальных пегматитов Чехии: фойтит–шерл, шерл–фойтит и эльбаит–шерл. По мнению авторов она обусловлена кристаллизацией минералов из высокотемпературных флюидов.

Распределение РЗЭ в исследованных турмалинах также свидетельствует об их формировании из высокотемпературных постмагматических растворов, обогащенных флюидной фазой (Скублов, 2005). В пользу такого предположения говорит повышенное содержание тантала при незначительном количестве ниобия в минеральных включениях из эльбаит–оленита жилы № 2 г. Охмыльк, а также присутствие среди этих включений чистого мангантанталита и образование кайм симпсонита на контакте включений танталита и турмалина. По мнению А.Ф. Соседко (1961), образование симпсонита и минералов, с которыми он ассоциирует, приурочено к последним стадиям формирования пегматитовых жил района.

Как показано в работе Е.В. Баданиной и соавторов (Badanina et al., 2015), посвященной изучению различных генераций минералов группы колумбита–танталита из пегматитов Колмозерского месторождения, ранние генерации минерала представлены колумбитом, а наиболее поздние – марганецсодержащим танталитом. По мнению авторов, образование последнего связано с гидротермальными процессами.

Все выше сказанное подтверждает предположения А.Ф. Соседко (1961) и В. В. Гордиенко (1996) о формировании альбит–сподуменовых пегматитов района при активной роли метасоматических процессов на поздних этапах, для которых характерна значительная концентрация Na, Li, Cs, Be, Ta, отчасти Nb, а также H₂O и F.

Авторы благодарны Ю.Л. Крецеру, Н.С. Власенко, В.Н. Бочарову, Н.В. Платоновой, С.Ю. Янсон, Н.С. Овчиниковой и О.В. Кашпар за консультации и помощь при выполнении исследований турмалина.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Булах А.Г. Руководство и таблицы для расчета формул минералов. М., Недра. 1967. 132 с.
- Быховский Л.З., Архипова Н.А. Редкометалльное сырье России: перспективы освоения и развития минерально-сырьевой базы // Разведка и охрана недр, 2016. С. 26–36.
- Волошин А.В., Гордиенко В.В., Гельман Е.М., Зорина М.Л., Елина Л.А., Кульчицкая Е.А., Меньшиков Ю.П., Полежаева Л.И., Рыжова Р.И., Соколов П.Б., Уточкина Г.И. Холтит – (первая находка в СССР) и его взаимоотношения с другими минералами тантала в редкометалльных пегматитах // ЗРМО. 1977. Вып. 3. С. 337–347.
- Гавриленко Б.В., Никитин И.В., Зозуля Д.Р., Кудряшов Н.М., Петровский М.Н., Корсаков О.П., Галкин Н.Н. Геология, тектоника, возраст и металлогения архейской шовной зоны Колмозеро-Воронья, Кольский регион // Вестник МГТУ. 2002. Т. 5 № 1. С. 43–60.
- Гордиенко В.В. Минералогия, геохимия и генезис сподуменовых пегматитов. Л., 1970. 240 с.
- Гордиенко В.В. Гранитные пегматиты. СПб., 1996. 272 с.
- Гранитные пегматиты. Т. 2. Редкометалльные пегматиты. Под редакцией Б.М. Шмакина. Новосибирск: Наука, 1997. 282 с.
- Загорский В.Е., Перетяжко И.С. Пегматиты с самоцветами Центрального Забайкалья. Новосибирск: Наука. 1992. 224 с.
- Мельянов О.О., Пономарева Н.И., Гордиенко В.В., Бочаров В.Н., Власенко Н.С., Шиловских В.В., Янсон С.Ю. Турмалин из редкометалльных пегматитов Колмозеро-Воронья (Кольский п-ов, Россия) // Мат. конф. “Минералогические музеи 2019. Минералогия вчера, сегодня, завтра”. СПб, 2019. С. 135–136.
- Минералы. Т. 3. М.: Наука, 1981. 398 с.
- Морозова Л.Н. Колмозерское литиевое месторождение редкометалльных пегматитов: новые данные по редкоэлементному составу (Кольский полуостров) // Литосфера. 2018. № 18(1). С. 82–98.
- Пеков И.В., Кононкова Н.Н. Рубидиевая минерализация в редкометалльных гранитных пегматитах Вороньих тундр (Кольский полуостров, Россия) // Геохимия. 2010. № 7. С. 741–760.
- Полканов А.А., Герлинг Э.К. Геохронология и геологическая эволюция Балтийского щита и его складчатого обрамления // Труды ЛАГЕД. 1961. Вып. 12. С. 7–102.
- Резникова О.Г., Кузнецов В.С., Абрамов В.В. Особенности распределения элементов-примесей в сульфидизированных железистых кварцитах и сланцах Стойленского месторождения КМА // Вестник ВГУ. 2010. Серия: геология № 2. С. 117–127.
- Скублов С.Г. Геохимия редкоземельных элементов в породообразующих метаморфических минералах. СПб.: Наука. 2005. 147 с.
- Соколов П.Б. Расчет кристаллохимических формул минералов по неполным микрозондовым данным (на примере группы турмалина) // ЗРМО. 1985. Вып. 6. С. 496–502.
- Соколов П.Б., Горская М.Г., Гордиенко В.В., Петрова М.Г., Крецер Ю.Л., Франк-Каменецкий В.А. Оленит $\text{Na}_{1-x}\text{Al}_3\text{Al}_6\text{B}_3\text{Si}_6\text{O}_{27}(\text{O},\text{OH})_4$ – новый высокоглиноземистый минерал из группы турмалинов // ЗРМО. 1986. Вып. 1. С. 119–123.
- Соколов П.Б., Горская М.Г., Крецер Ю.Л. Цинксодержащие турмалины редкометалльных пегматитов // ЗРМО. 1988. Вып. 1. С. 70–74.
- Солодов Н.А. Внутреннее строение и геохимия редкометалльных гранитных пегматитов. М., 1962. 207.
- Соседко А.Ф. Материалы по минералогии и геохимии гранитных пегматитов. М., 1961. 154 с.

Minerals of the Tourmaline Supergroup from Rare Metal Pegmatites of the Voronya Tundra (Kola Peninsula, Russia)

N. I. Ponomareva^a, *, V. V. Gordienko^a, N. O. Melyanov^a

^aSaint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

*e-mail: n_ponomareva@mail.ru

The article displays results of the study of dark-colored, bright, and pale pink tourmalines of rare-metal pegmatites from the Okhmylk mountain in the Voronya Tundras region. Chemical compositions and parameters of elementary cell were determined for the tourmalines. It is shown that dark-colored tourmaline I is the shorl-olenite and the pink tourmaline corresponds to the elbaite-olenite species. There has been carried out the comparative analysis of studied tourmalines with tourmalines from spodumene pegmatites of other regions. Studied distribution of REE in tourmalines indicates their formation with participation of high-temperature post-magmatic solutions. Mineral inclusions in shorl-olenite are represented by bi-

otite and magnetite. Mineral inclusions in elbaite-olenite are cassiterite, pollucite, apatite, tantalite. Tantalite is characterized by an increased content of tantalum and the minor amount of niobium. Besides, the pure mangantantalite is often present in elbaite-olenite, and simpsonite is always observed at contacts between tantalite inclusions and tourmaline. All these data indicate formation of albite-spodumene pegmatites of the region with an active role of metasomatic processes.

Keywords: spodumene pegmatites, tourmaline, shorl, elbaite, inclusions in tourmaline

REFERENCES

- Badanina E.V., Sitnikova M.A., Gordienko V.V., Melcher F., Gäbler H.-E., Lodziak J., Syritso L.F. Mineral chemistry of columbite–tantalite from spodumene pegmatites of Kolmozero, Kola Peninsula (Russia). *Ore Geology Reviews*. **2015**. Vol. 64. P. 720–735.
- Bulakh A.G. Guide and tables for the calculation of mineral formulas. Moscow: Nedra, **1967**. 132 p. (in Russian).
- Bykhovskiy L.Z., Arkhipova N.A. Rare metal raw materials of Russia: prospects for the development and development of the mineral resource base. In: *Exploration and protection of mineral resources*. **2016**. P. 26–36 (in Russian).
- Cempirek J., Novak M., Ertl A., Hughes J.M., Rossman G.R., Dyar M.D. Fe-bearing olenite with tetrahedrally coordinated Al from an abyssal pegmatite at Kutna Hora, Czech Republic: Structure, crystal chemistry, optical and XANES spectra. *Canad. Miner.* **2006**. Vol. 44. P. 23–30.
- Gavrilenko B.V., Nikitin I.V., Zozulya D.R., Kudryashov N.M., Petrovskiy M.N., Korsakov O.P., Galkin N.N. Geology, tectonics, age and metallogeny of the Archean suture zone of Kolmozero-Voronya, Kola region. *Vestnik MGTU*. **2002**. Vol. 5 № 1. P. 43–60 (in Russian).
- Gordienko V.V. Mineralogy, geochemistry and genesis of spodumene pegmatites. Leningrad, **1970**. 240 p. (in Russian).
- Gordienko V.V. Granite pegmatites. Saint Petersburg, **1996**. 272 p. (in Russian).
- Gordienko V.V., Ponomareva N.I., Kretser Yu.L. Staurolite and associated minerals from rare metal granite pegmatite. *Geol. Ore Deposits*. **2012**. Vol. 54. N. 8. P. 676–687.
- Granite pegmatites. Vol. 2. Rare metal pegmatites. Ed. B.M. Shmakin. Novosibirsk: Nauka, **1997**. 282 p. (in Russian).
- Melyantsov N.O., Ponomareva N.I., Gordienko V.V., Bocharov V.N., Vlasenko N.S., Shilovskikh V.V., Yanson S.Yu. Tourmaline from rare-metal pegmatites of Kolmozero-Voronya (Kola Peninsula, Russia). In: *Proc. Conf. "Mineralogical museums 2019. Mineralogy yesterday, today, tomorrow"*. Saint Petersburg, **2019**. P. 135–136 (in Russian).
- Minerals. Vol. 3. Moscow: Nauka, **1981**. 398 p. (in Russian).
- Morozova L.N. Kolmozerskoye lithium deposit of rare-metal pegmatites: new data on the rare-element composition (Kola Peninsula). *Lithosphere*. **2018**. Vol. 18 (1). P. 82–98 (in Russian).
- Novák M., Henry D.J., Hawthorne F.C., Ertl A., Uher P., Dutrow B.L., Pezzotta F. Nomenclature of the tourmaline-group minerals. *Report of the Subcommittee on Tourmaline Nomenclature to the International Mineralogical Association's Commission on New Minerals, Nomenclature and Classification (CNMMN), as approved by the CNMMN at July 8th*. **2009**. 45 p.
- Pekov I.V., Kononkova N.N. Rubidium mineralization in rare-metal granite pegmatites of the Crow tundra (Kola Peninsula, Russia). *Geochem.* **2010**. № 7. P. 741–760 (in Russian).
- Polkanov A.A., Gerling E.K. Geochronology and geological evolution of the Baltic shield and its folded frame. *Proc. LAGÉD*. **1961**. N 12. P. 7–102 (in Russian).
- Reznikova O.G., Kuznetsov V.S., Abramov V.V. Features of the distribution of rare elements in sulfidized ferruginous quartzites and shales of the Stoilensky KMA deposit. *Bull. Voronezh State Univ. Ser. Geol.* **2010**. N 2. P. 117–127 (in Russian).
- Selway J.B., Novak M., Cerny P., Hawthorne F.C. Compositional evolution of tourmaline in lepidolite-subtype pegmatites. *Europ. J. Miner.* **1999**. Vol. 11. N 3. P. 569–584.
- Skublov S.G. Geochemistry of rare earth elements in rock-forming metamorphic minerals. Saint Petersburg: Nauka, **2005**. 147 p. (in Russian).
- Sokolov P.B. Calculation of crystal chemical formulas of minerals based on incomplete microprobe data (on the example of the tourmaline group). *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1985**. N 6. P. 496–502 (in Russian).
- Sokolov P.B., Gorskaya M.G., Gordienko V.V., Petrova M.G., Kretser Yu.L., Frank-Kamenetsky V.A. Olenite $\text{Na}_{1-x}\text{Al}_3\text{Al}_6\text{B}_3\text{Si}_6\text{O}_{27}(\text{O},\text{OH})_4$ – a new high-alumina mineral from the tourmaline group. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1986**. N 1. P. 119–123. (in Russian).
- Sokolov P.B., Gorskaya M.G., Kretser Y.L. Zinc-containing tourmalines of rare metal pegmatites. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1988**. N 1. P. 70–74 (in Russian).

Solodov N.A. Internal structure and geochemistry of rare-metal granite pegmatites. Moscow **1962**. 207 p. (in Russian).

Sosedko A.F. Materials on mineralogy and geochemistry of granite pegmatites. Moscow, **1961**. 154 p. (in Russian).

Teertstra D.K., Černý P., Ottolini L. Stranger in paradise: liddicoatite from the high grade dike pegmatite, southeastern Manitoba, Canada. *Europ. J. Miner.* **1999**. Vol. 11. N 2. P. 227–236.

Voloshin A.V., Gordienko V.V., Gelman E.M., Zorina M.L., Elina L.A., Kulchitskaya E.A., Menshikov Yu.P., Polezhaeva L.I., Ryzhova R.I., Sokolov P.B., Utochkina G.I. Holtite (the first find in the USSR) and its relationship with other tantalum minerals in rare-metal pegmatites. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1977**. N 3. P. 337–347 (in Russian).

Zagorsky V.E., Peretyazhko I.S. Pegmatites with gems of Central Transbaikalia. Novosibirsk: Nauka, **1992**. 224 p. (in Russian).