

УДК 548.736.626:550.425

## ЗОНАЛЬНОСТЬ ШЕРЛОВ ИЗ ПЕГМАТИТОВЫХ ЖИЛ ТУРКЕСТАНСКОГО ХРЕБТА (КИРГИЗИЯ)

*В.К. Герасимов<sup>1</sup>, Л.А. Сергеева<sup>2</sup>, О.Н. Лопатин<sup>2</sup>, А.В. Мухаметшин<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
г. Томск, 634050, Россия*

<sup>2</sup>*Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, 420008, Россия*

### Аннотация

В процессе многолетних полевых сезонов в пределах Туркестанского хребта, расположенного в юго-западной части Киргизии (высокогорный Тянь-Шань), обнаружены пегматитовые жилы редкометального генетического типа. Наряду с кварцем, полевыми шпатами и слюдами, одним из распространенных минералов данных пегматитовых жил является черный турмалин – шерл. Петрографическое изучение шлифов кристаллов черного турмалина под микроскопом позволило выявить их зональное строение. Центральные части практически всех кристаллов шерла оказались окрашены в синий или зеленый цвет, тогда как периферические зоны – в коричневый. Методом оптико-спектроскопического микрозондового сканирования в высокочувствительном режиме «счета фотонов» проведено комплексное экспериментальное изучение зональности шерлов. Путем анализа оптически-активных центров, проявляющихся в оптических спектрах поглощения, доказано изменение генетических условий пегматитообразования, а именно изменение восстановительной обстановки на окислительную и уменьшение общей железистости среды формирования пегматитов. Показана информативность изменения кристаллохимических особенностей турмалинов в генетических аспектах эволюции и становления пегматитовых комплексов Туркестанского хребта юго-западного Тянь-Шаня.

**Ключевые слова:** турмалин, пегматитовые комплексы, оптическая спектроскопия, энергодисперсионная спектроскопия, кристаллохимические особенности шерлов

### 1. Объект исследований

Пегматитовые жилы являются главным источником ювелирно-поделочного минерального сырья, а также руд редких и рассеянных химических элементов. Вместе с тем пегматитовые комплексы представляют собой весьма сложные образования в генетическом отношении. До сих пор не существует универсальной классификации и типологии пегматитов. Наряду с общеизвестными гипотезами пегматитообразования А.Е. Ферсмана и А.Н. Заварицкого, как в России, так и за рубежом существует множество классификаций конкретных пегматитовых жил, расположенных в пределах различных геологических провинций или регионов.

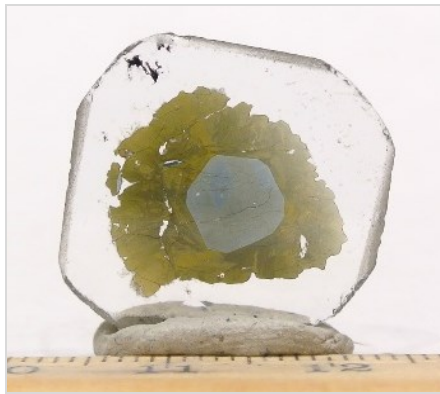


Фото 1. Утолщенный петрографический шлиф черного турмалина зонального строения. Срез перпендикулярен оси *C* кристалла

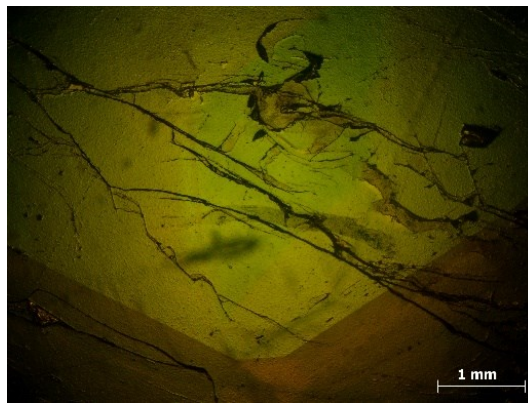


Фото 2. Контакт центральной зеленой зоны и периферической коричневой зоны кристалла шерла. Срез перпендикулярен оси *C* кристалла

Одним из широко распространенных и одновременно информативных минералов пегматитовых комплексов является турмалин. Объектом настоящего исследования являлись черные турмалины (шерлы), отобранные в процессе полевых сезонов из редкометальных пегматитовых жил Туркестанского хребта, расположенного в юго-западной части высокогорной Киргизии на границе с Таджикистаном. Именно данные пегматитовые комплексы Тянь-Шаня были описаны ранее в классической монографии А.Е. Ферсмана [1] как типичные представители редкометального генетического типа.

Уже на этапе пробоподготовки при изготовлении из кристаллов турмалина тонких плоскопараллельных пластин выяснилось, что изучаемые шерлы имеют зональное внутреннее строение. Черные в монокристаллах, в утолщенных петрографических шлифах препараты турмалинов были окрашены в коричневые, синие и зеленые цвета. При этом в тонких срезах, перпендикулярных оси *C*, кристаллы с периферии были окрашены в коричневый цвет, отвечая по своим колориметрическим параметрам бурому дравиту, тогда как в центральных частях имели либо синюю, либо зеленую окраску. Граница между центральными и периферическими зонами даже при макроскопическом наблюдении отслеживалась четко (фото 1, 2). Если зональное, секториальное и полихромное строение

кристаллов светлоокрашенных турмалинов – обычная вещь, сам по себе факт выявления зональности черных турмалинов нетривиален и, по нашим данным, был описан ранее лишь однажды [2]. Изложенное однозначно указывает на резкое изменение условий в процессе формирования турмалинов и образование кристаллов минерала как минимум в два этапа, отличающихся друг от друга физико-химическими параметрами среды минералообразования.

Турмалин является порообразующим кольцевым боросиликатом, кристаллическая структура которого осложнена тремя неэквивалентными катионными позициями  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  [3], а также каналами, в которые входят гидроксильные группы  $(OH)^-$ . Изоморфное вхождение в данные структурные позиции одно-, двух- и трехвалентных катионов предопределяет наличие обширных изоморфных рядов группы турмалина и разнообразие окраски данного минерала. Многие из цветных турмалинов обладают незаурядными декоративными свойствами и являются ювелирными камнями.

## 2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Вопросам, связанным с изучением природы окраски турмалинов, посвящен ряд обобщающих научных статей и монографий ([4, 5] и др.), основными методами экспериментальных исследований которых являются адсорбционная и люминесцентная оптическая спектроскопия.

Кристаллохимические особенности описываемых турмалинов пегматитовых жил Туркестанского хребта также изучались методами абсорбционной оптической спектроскопии в специализированной лаборатории Казанского федерального университета. Лабораторный модуль включал в себя источник света, монохроматор МДР-4, кварцевый световод, микроскоп МИН-8 и блок регистрации – ФЭУ-79, работающий в высокочувствительном режиме «счета фотонов». Регистрация оптических спектров поглощения турмалинов осуществлялась по зонам в режиме оптико-спектроскопического микронзондового сканирования по методике, подробно описанной ранее [6].

В оптических спектрах поглощения всех исследованных кристаллов (и их зон) в видимом диапазоне длин волн четко проявляются две широкие полосы поглощения (рис. 1): при 450 и 730 нм. Интерпретация полосы поглощения при 450 нм не является однозначной [7, 8]. Положение данной полосы в спектрах, её полуширина и поляризация отвечают области электронного перехода  ${}^6A_1(S) \rightarrow {}^4A_1, {}^4E(G)$  ионов  $Fe^{3+}$ . С учетом постоянного присутствия в шерлах ионов четырехвалентного титана наличие в данных спектрах полосы поглощения при 450 нм может быть усилено обменно-связанным взаимодействием в парах  $Fe^{3+} - Ti^{4+}$  ионов, занимающих октаэдрические позиции структуры турмалина.

Интерпретация полосы поглощения при 730 нм является однозначной: её возникновение связано с электронным переходом  ${}^5T_2(D) \rightarrow {}^5E(D)$  в ионах  $Fe^{2+}$ , занимающих октаэдрические  $Y$ -позиции кристаллической структуры турмалина.

Нередко в оптических спектрах изученных турмалинов на длинноволновом крыле полосы поглощения 450 нм в виде перегиба отмечается слабая полоса поглощения при 550 нм. По положению в спектре и поляризации данная полоса поглощения более всего отвечает электронному переходу  ${}^6A_1(S) \rightarrow {}^4T_2(G)$  в ионах  $Fe^{3+}$ , находящихся в обменно-связанных парах  $Fe^{3+} - Ti^{4+}$ .

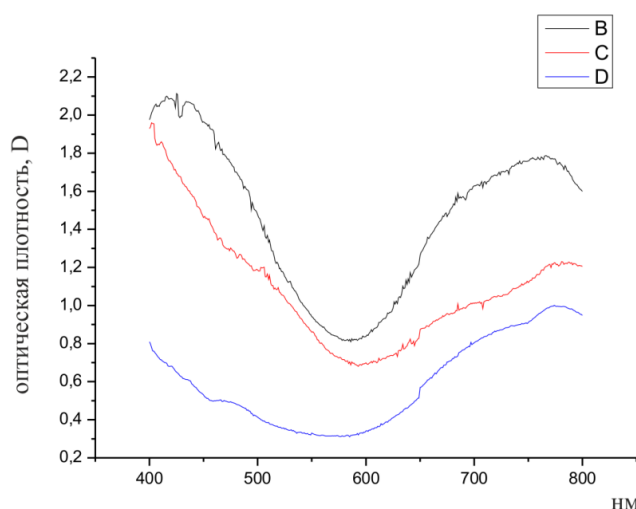


Рис. 1. Оптические спектры поглощения шерлов: В) центральная зеленая зона, С) периферическая коричневая зона, D) центральная синяя зона

Кроме описанных широких полос поглощения в оптических спектрах практически всех изученных турмалинов Туркестанского хребта отмечаются слабоинтенсивные перегибы при 435, 495, 520 нм. Они обусловлены электронными переходами  ${}^6A_1(S) \rightarrow {}^4A_1, {}^4E(G), {}^4T_2(G), {}^4T_1(G)$  соответственно и, по аналогии с другими силикатными минералами, обязаны своим происхождением тетраэдрически координированным ионам  $Fe^{3+}$ . Такие слабые по интенсивности и узкие полосы поглощения не оказывают существенного влияния на природу окраски и колориметрические параметры изученных турмалинов.

Доминирующей в спектрах центральных синих зон кристаллов является полоса поглощения при 730 нм ионов  $Fe^{2+}$ , тогда как полоса поглощения при 450 нм парных центров  $Fe^{3+} - Ti^{4+}$  является слабой. В результате такой конфигурации оптических спектров максимум пропускания оказывается смещенным в синюю и голубую области видимого диапазона длин волн (рис. 1). В спектрах центральных зон кристаллов, окрашенных в зеленоватый цвет, интенсивность вышеназванных полос поглощения практически соизмерима, в связи с чем широкое и асимметричное «окно» пропускания приходится на зеленую область. Как уже было отмечено, спектры коричневатых периферических зон кристаллов турмалинов характеризуются тем же набором полос поглощения. Однако отличительной особенностью их является большая интенсивность полосы поглощения при 450 нм. Именно вследствие доминирующего положения этой полосы поглощения парных центров  $Fe^{3+} - Ti^{4+}$  «окно» пропускания сдвигается в длинноволновую область, окраска шерлов меняется от зеленой до зеленовато-коричневой и грязно-коричневой. Таким образом, на примере кристаллохимической тенденции от  $Fe^{2+}$  к  $Fe^{3+}$ , можно констатировать факт возрастания окислительного потенциала среды формирования жил Туркестанского пегматитового поля.

При этом анализ химического состава, выполненный методом микрозондовой рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС), позволил выявить дополнительную кристаллохимическую тенденцию. В табл. 1 приведены результаты

Табл. 1

Сравнительная характеристика элементного химического состава различно окрашенных зон кристаллов турмалина

Центральная синяя зона			Периферическая коричневая зона		
Элемент	Вес, %	Атом. вес %	Элемент	Вес, %	Атом. Вес %
O	51.76	66.78	O	52.83	67.25
Na	1.59	1.43	Na	1.93	1.71
Mg	1.66	1.41	Mn	3.65	1.35
Al	18.80	14.39	Al	21.31	16.09
Si	17.3	12.72	Si	17.24	12.5
Fe	8.89	3.29	Fe	3.03	1.1

РФЭС-анализа центральных и периферических зон кристаллов изученных турмалинов. Суммарная концентрация ионов разновалентного железа в центральных зонах, окрашенных в различные оттенки сине-зеленого цвета, практически в три раза превышает таковую в периферических зонах, окрашенных в коричневые тона. Это является показателем уменьшения общей железистости среды в процессе формирования и эволюции пегматитовых жил Туркестанского складчатого пояса.

Таким образом, полученные результаты показывают, что цветовые характеристики и колориметрические параметры изученных турмалинов определяются относительной концентрацией оптически-активных центров (ОАЦ), представленных элементами группы железа (ионы  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ , опосредованно  $Ti^{4+}$ ) и занимающих различные структурные позиции минерала. Анализ соотношения концентраций тех или иных ОАЦ, выполненный путем сравнения соотношений интенсивностей полос поглощения в спектрах турмалинов, позволяет выявить некоторые геохимические особенности процессов пегматитообразования Туркестанского хребта.

### Заключение

На основе вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

Турмалины шерл-дравитового изоморфного ряда являются чутким индикатором изменения и эволюции среды образования пегматитов. Это определяется особенностями и сложностью кристаллической структуры минерала и, в свою очередь, возможностью неограниченного изоморфизма разновалентных катионов группы железа.

Процесс формирования турмалинов (шерлов) пегматитовых жил Туркестанского хребта имел дискретный характер и протекал как минимум в два этапа. На первом этапе формировались центральные зоны кристаллов турмалина, окрашенные в синие или зеленые цвета, после определенного временного перерыва формировались периферические зоны кристаллов, имеющие коричневую, дравитоподобную окраску.

Анализ ОАЦ, выполненный на основе адсорбционных оптических спектров турмалинов, позволяет констатировать увеличение окислительного потенциала на фоне уменьшения общей железистости среды минералообразования, что логично вписывается в геохимическую эволюцию формирования пегматитов

и в историю становления Туркестанского пегматитового поля юго-западной части складчатой системы Тянь-Шаня.

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность кандидату физико-математических наук Б.М. Галиуллину (КФУ) за проведенные исследования образцов методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии.

#### Литература

1. *Ферсман А.Е.* Пегматиты. Т. 1: Гранитные пегматиты. – М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1940. – 712 с.
2. *Бахтин А.И., Лопатин О.Н.* Кристаллохимические и генетические особенности шерлов из пегматитов Туркестанского хребта // Реальная структура и свойства минералов: Сб. ст. / Ред. В.М. Винокуров. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1989. – С. 3–12.
3. *Брэгг У., Кларингбулл Г.* Кристаллическая структура минералов. – М.: Мир, 1967. – 391 с.
4. *Платонов А.Н., Таран М.Н., Балицкий В.С.* Природа окраски самоцветов. – М.: Недра, 1984. – 197 с.
5. *Бахтин А.И.* Породообразующие силикаты: оптические спектры, кристаллохимия, закономерности окраски, типоморфизм. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1985. – 193 с.
6. *Бахтин А.И., Денисов И.Г., Лопатин О.Н.* Возможности современной оптической спектроскопии в исследовании минералов // Спектроскопия, рентгенография и кристаллохимия минералов: Материалы Междунар. науч. конф. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1997. – С. 11–30.
7. *Faye G.H., Manning P.G., Gosselin T.R., Trembley T.R.* The optical absorption spectra of tourmaline: importance of charge-transfer processes // Can. Mineral. – 1974. – V. 12, No 6. – P. 370–380.
8. *Smith G.* A reassessment of the role of iron in the 5,000–30,000  $\text{cm}^{-1}$  region of the electronic absorption spectra of tourmaline // Phys. Chem. Minerals. – 1978. – V. 3, No 4. – P. 134–138. – doi: 10.1007/BF00311847.

Поступила в редакцию  
08.06.18

---

**Герасимов Вячеслав Константинович**, ассистент кафедры минералогии и геохимии

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
ул. Ленина, д. 36, г. Томск, 634050, Россия  
E-mail: [I.gerasimov@mail.ru](mailto:I.gerasimov@mail.ru)

**Сергеева Лилия Александровна**, студент Института геологии и нефтегазовых технологий

Казанский (Приволжский) федеральный университет  
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия  
E-mail: [lsergeeval1996@gmail.com](mailto:lsergeeval1996@gmail.com)

**Лопатин Олег Николаевич**, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры минералогии и литологии

Казанский (Приволжский) федеральный университет  
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия  
E-mail: [Oleg.Lopatin@kpfu.ru](mailto:Oleg.Lopatin@kpfu.ru)

Мухаметшин Адиб Вильдарович, ассистент кафедры минералогии и литологии

Казанский (Приволжский) федеральный университет

ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия

E-mail: *adib.mv@gmail.com*

ISSN 2542-064X (Print)

ISSN 2500-218X (Online)

UCHENYE ZAPISKI KAZANSKOGO UNIVERSITETA. SERIYA ESTESTVENNYE NAUKI

(Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series)

2018, vol. 160, no. 3, pp. 459–466

### Zonality of Schorls from Pegmatite Veins of the Turkestan Range (Kyrgyzstan)

*V.K. Gerasimov<sup>a\*</sup>, L.A. Sergeeva<sup>b\*\*</sup>, O.N. Lopatin<sup>b\*\*\*</sup>, A.V. Mukhametshin<sup>b\*\*\*\*</sup>*

<sup>a</sup>*Tomsk State National Research University, Tomsk, 634050 Russia*

<sup>b</sup>*Kazan Federal University, Kazan, 420008 Russia*

E-mail: <sup>\*</sup>*l.gerasimov@mail.ru*, <sup>\*\*</sup>*lsergeeval1996@gmail.com*, <sup>\*\*\*</sup>*Oleg.Lopatin@kpfu.ru*,  
<sup>\*\*\*\*</sup>*adib.mv@gmail.com*

Received June 8, 2018

#### Abstract

In the course of a long-term field research within the borders of the Turkestan Range located in the southwestern part of Kyrgyzstan (high-altitude Tien Shan), pegmatite veins of a rare-metal genetic type have been found. Along with quartz, feldspars, and micas, one of the most common minerals of these pegmatite veins is black tourmaline, schorl. The petrographic study of the thin sections of black tourmaline crystals under a microscope has revealed their zonal structure. The central parts of almost all the schorl crystals are colored blue or green, while the peripheral areas are brown. Using the optical spectroscopic microprobe scanning, in the highly sensitive mode of photon counting, a complex experimental study of schorl zonality has been performed. Based on the analysis of the optically active centers manifested in the optical absorption spectra, changes in the genetic conditions of pegmatite formation have been confirmed, namely, the change in the reducing environment to oxidative one and the decrease in the total iron content of the pegmatite formation environment. The informative character of the changes in the crystallochemical features of tourmalines in the genetic aspects of the evolution and formation of the pegmatite complexes of the Turkestan Range in the southwestern Tien Shan has been shown.

**Keywords:** tourmaline, pegmatite complexes, optical spectroscopy, energy dispersive spectroscopy, crystallochemical features of schorls

**Acknowledgments.** We sincerely thank B.M. Galiullin, PhD in Physics and Mathematics, Kazan Federal University, for the energy dispersive X-ray spectroscopy of the samples.

#### Figure Captions

Photo 1. The thickened petrographic section of the black tourmaline having a zonal structure. The section is perpendicular to the *C* axis of the crystal.

Photo 2. The contact of the central green zone and the peripheral brown zone of the schorl crystal. The section is perpendicular to the *C* axis of the crystal.

Fig. 1. The optical absorption spectra of schorls.

#### References

1. Fersman A.E. *Pegmatity* [Pegmatites]. Vol. 1: Granite Pegmatites. Moscow, Leningrad, Izd. Akad. Nauk SSSR, 1940. 712 p. (In Russian)

2. Bakhtin A.I., Lopatin O.N. Crystallochemical and genetic features of the schorls from pegmatites of the Turkestan Range. In: Vinokurov V.M. (Ed.) *Real'naya struktura i svoistva mineralov* [Real Structure and Properties of Minerals]. Kazan, Izd. Kazan. Univ., 1989, pp. 3–12. (In Russian)
3. Bragg W., Claringbull G. F. *Crystal Structures of Minerals*. London, Bell, 1965. ix, 409 p.
4. Platonov A.N., Taran M.N., Balitskii V.S. *Priroda okraski samotsvetov* [The Nature of Gem Color]. Moscow, Nedra, 1984. 197 p. (In Russian)
5. Bakhtin A.I. *Porodoobrazuyushchie silikaty: opticheskie spektry, kristallokhimiya, zakonomernosti okraski, tipomorfizm* [Rock-Forming Silicates: Optical Spectra, Crystal Chemistry, Color Patterns, Typomorphism]. Kazan, Izd. Kazan. Univ., 1985. 193 p. (In Russian)
6. Bakhtin A.I., Denisov I.G., Lopatin O.N. Possibilities of modern optical spectroscopy in the study of minerals. *Spektroskopiya, rentgenografiya i kristallokhimiya mineralov: Materialy Mezhdunar. nauch. konf.* [Spectroscopy, X-Ray Diffraction, and Crystallochemistry of Minerals: Proc. Int. Sci. Conf.]. Kazan, Izd. Kazan. Univ., 1997, pp. 11–30. (In Russian)
7. Faye G.H., Manning P.G., Gosselin T.R., Trembley T.R. The optical absorption spectra of tourmaline: Importance of charge-transfer processes. *Can. Mineral.*, 1974, vol. 12, no. 6, pp. 370–380.
8. Smith G. A reassessment of the role of iron in the 5,000–30,000  $\text{cm}^{-1}$  region of the electronic absorption spectra of tourmaline. *Phys. Chem. Minerals*, 1978, vol. 3, no. 4, pp. 134–138. doi: 10.1007/BF00311847.

⟨ **Для цитирования:** Герасимов В.К., Сергеева Л.А., Лопатин О.Н., Мухаметшин А.В. Зональность шерлов из пегматитовых жил Туркестанского хребта (Киргизия) // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2018. – Т. 160, кн. 3. – С. 459–466. ⟩

⟨ **For citation:** Gerasimov V.K., Sergeeva L.A., Lopatin O.N., Mukhametshin A.V. Zonality of schorls from pegmatite veins of the Turkestan Range (Kyrgyzstan). *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennyye Nauki*, 2018, vol. 160, no. 3, pp. 459–466. (In Russian) ⟩