УДК 549.655 (470.55)

О ТИТАНИТЕ В ВИШНЕВОГОРСКОМ ЩЕЛОЧНОМ КОМПЛЕКСЕ (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

В.А. Попов

Институт минералогии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., 456317 Россия; popov@mineralogy.ru

TITANITE OF THE VISHNEVOGORSKY ALKALINE COMPLEX (SOUTH URAL)

V.A. Popov

Institute of Mineralogy UB RAS, Miass, Chelyabinsk district, 456317 Russia; popov@mineralogy.ru

Титанит CaTi(SiO₄)O – распространенный акцессорный минерал щелочных пород и пегматитов Вишневогорского щелочного комплекса на Южном Урале. Он входит во многие магматические парагенезисы, обнаружен в некоторых метасоматитах, претерпел деформацию и рекристаллизацию, образовал двойники по {100} и монокристаллы зонально-секториального строения, разного габитуса, цвета и состава с формами {110}, {111}, {100}, {001} и { \overline{I} 11}. В химическом составе титанита постоянно фиксируются повышенные концентрации Nb, Na, Al, Fe, V, РЗЭ. В некоторых типах руд (зона 125) обилие титанита мешает обогащению пирохлоровых концентратов.

Илл. 8. Табл. 1. Библ. 5. *Ключевые слова:* титанит, щелочной комплекс пород, Южный Урал.

Titanite $CaTi(SiO_4)O$ is a common accessory mineral of alkaline rocks and pegmatites of the Vishnevogorsky alkaline complex, South Urals. It occurs in many magmatic assemblages, is found in some metasomatites, underwent deformation and recrystallization. Titanite is characterized by zonal-sectorial structure, various habit, color and composition and exhibits twins along {100} and monocrystals with forms of {110}, {111}, {100}, {001}, and {T11}. It contains high amount of Nb, Na, Al, Fe, V, and REE. In some ore types (zone 125), abundant titanite hampers concentration of pyrochlore concentrates.

Figures 8. Table 1. References 5.

Key words: titanite, alkaline rock complex, South Urals.

Введение

Титанит в Вишнёвых горах впервые был встречен в пегматитах Курочкина Лога (Амеландов, 1929) и подробно рассмотрен в монографиях (Бонштедт-Куплетская, 1951; Еськова и др., 1964) и ряде статей. Титанит является характерным акцессорным минералом зоны фенитов, встречается в миаскитах, биотитовых сиенитах, щелочных пегматитах и почти во всех породах, связанных с различными этапами минерализации. В фенитах отмечалось 1.54 мас. % титанита, в миаскитах от 0.02 мас. % в Центральном массиве до 0.29 мас. % в Западном пластовом теле, а в биотитовых сиени-

Э.М. Бонштедт-Куплетская (1951, с. 106–107) рассматривала некоторые разновидности титанита из пегматитов в качестве метакристаллов: «...Из всех сложных пегматитов сфен наблюдался мною

0.7 мас. % (Левин и др., 1997).

всех сложных пегматитов сфен наблюдался мною лишь в линзах Курочкина лога и в Цирконовом шурфе, где он является *типичнейшим минералом метасоматоза*... Сфен выделился в уплощенных кристаллах, достигающих 10–12 см, то янтарно-

тах (вокруг Западного тела) – 0.21 мас. % (Еськова и др., 1964). Среднее содержание титанита в рудах

зоны 140 весьма низкое (~0.01 мас. % в карбона-

титах и ~0.003 г/т в кальцит-полевошпатовых пег-

матоидах), а в фенитах зоны 147 выше – до 0.2-

желтых с сильным стеклянным блеском и просвечивающих, то более бурых и матовых. В последнем случае при больших увеличениях микроскопа в сфене удается различать мельчайшие включения пирохлора и иногда флюорита. ...Кристаллы этого сфена несколько вытянуты по оси [001], образованы преимущественно гранями m(110) и n(111), реже на них развиваются узкие грани a(100) и небольшие $t(\bar{1}11)$, а также c(001)». В работе Е.М. Еськовой с соавторами (1964) отмечалось, что во всех щелочных породах титанит образует ксеноморфные зерна размером 0.05–0.8 мм, а в пегматитах – уплощенные хорошо образованные кристаллы (из расплава-раствора).

За прошедшее время накопились новые данные, касающиеся генезиса, поверхностей и анатомии кристаллов титанита, их деформации и рекристаллизации, которые позволяют уточнить некоторые детали в моделях минералообразования. Состав минералов определен в Институте минералогии УрО РАН (SEM Vega3 Tescan, аналитик И.А. Блинов). Форма кристаллов вычерчена по данным гониометрии с использованием столика Фёдорова СФ-4. Ниже приведены полученные нами данные о взаимоотношениях титанита с минералами пегматитов и неоднородности его состава.

Морфология и минеральные ассоциации титанита Вишнёвых гор

В разных объектах Вишневогорского щелочного комплекса титанит характеризуется разными качествами, величиной и формами (рис. 1). Габитус кристаллов обусловлен преимущественно относительным развитием граней двух призм: *т* {110} и n {111}, а двойники обычно удлинены вдоль [001] (рис. 2 и 3). Цвет кристаллов обусловлен оттенками желтого, коричневого и красного (рис. 4). Явная цветовая зональность в анатомической картине титанитов проявляется редко из-за наложения трещиноватости, активированной отдельности и наличия включений (рис. 5). На большинстве включений наблюдались индукционные поверхности одновременного их роста с титанитом. Однако относительное время сокристаллизации титанита с другими минералами в разных случаях отличаются: встречаются включения минералов как по зонам роста, так и незакономерно. Так, в двойнике титанита В-19 из миаскитового пегматита Курочкина Лога видна зона роста вблизи периферии с обилием мелких включений-вростков марганцовистого ильменита (рис. 5а) с редкими микрозернами фторкальциопирохлора, кальцита, магнетита, ульвошпинели, циркона, цирконолита и калиевого полевого шпата (Попов и др., 2018).

В сечении зонального двойника титанита В-18 из Курочкина Лога содержания Nb₂O₅ варьируют от 2.87 мас. % в относительно светлых коричневых зонах до 4.72 мас. % в наиболее темных зонах (рис. 5б). В титаните присутствуют очень мелкие вростки ильменита, фторкальциопирохлора, циркона, галенита и рутила, и вскрыт агрегат канкринита с полевыми шпатами и аннитом. В относительно однородном по цвету титаните В-20 (из фенитов рудной зоны 125 на северо-восточном склоне горы Каравай) в сечении, перпендикулярном граням призмы {111} (рис. 5в), содержание Nb₂O₅ меньше (0.84-1.10 мас. %), но отмечаются примеси Ce₂O₃ (0.3–0.9 мас. %) и Y_2O_3 (0.6–1.0 мас. %), а также редкие включения полевых шпатов. Титанит В-29 из «Копи сфена» Свистунова лога содержит примеси Nb₂O₅ до 3.68 мас. % и относительно крупные вростки полевых шпатов и канкринита (рис. 5 г), а также микровключения содалита, пирофанита, фторкальциопирохлора, ильменита, цирконолита, стрональсита и банальсита; и сходен с титанитом Курочкина Лога (Попов и др., 2018).

В крупнозернистых пегматитовых агрегатах зоны 125 на индивидах титанита присутствуют индукционные поверхности сокристаллизации с полевыми шпатами, пироксенами, амфиболами, фторапатитом, кальцитом и другими минералами (рис. 6). С эгирином и экерманнитом встречены ориентированные (синтаксические) срастания (см. рис. 36 и 66). Метакристаллы титанита в этих случаях не отмечены.

Сложные для генетической интерпретации случаи встречены в титанит-ильменитовых ассоциациях. Отмечается синхронное образование этих минералов с индукционными поверхностями между ними (рис. 7а), а также агрегаты перекристаллизации минералов в полосах пластической деформации (рис. 76) в пегматитах. В некоторых участках деформации подверглись одновременно несколько минералов (титанит, ильменит, фторапатит, кальцит), в результате чего образовались мелкие изометричные полиэдры перекристаллизации, среди которых встречаются напряженные (изогнутые, скрученные) реликты этих же минералов. Отмечались псевдоморфозы титанита по ильмениту или ильменита по титаниту, однако значительные тела с такими псевдоморфозами не обнаружены.



Puc. 1. Зерна титанита (указаны стрелкой) в миаскитах Вишнёвых гор: а, 6 - Свистунов лог; в, r - Курочкин Лог. *Fig. 1.* Titanite grains in miaskite of the Vishnevye Mountains: а, 6 - Svistunov Log; в, r - Kurochkin Log.



Puc. 2. Формы кристаллов титанита в миаскитах и их пегматитах. *Fig. 2.* Titanite crystals in miaskites and their pegmatites.



Рис. 3. Модели двойника титанита (а) и синтаксического сростка титанита с эгирином (Aeg) и экерманнитом (Eck) (б).

Fig. 3. Models of titanite twin (a) and syntactic intergrowth of titanite with aegirine (Aeg) and eckermannite (Eck) (6).



Рис. 4. Вишневогорский титанит из частных коллекций Ю.М. Корепанова (а, в) и С.Ю. Крюкова (б; двойник по {100}).

Fig. 4. Vishnevogorsky titanite from private collections of Y.M. Korepanov (a, B) and S.Y. Kryukov (6; twin by $\{100\}$).



Рис. 5. Неоднородности кристаллов титанита в сечении \perp {110} (обр. а – В-19, б – В-29, в – В-18) и \perp {111} (обр. г – В-20).

Fig. 5. Heterogeneous titanite crystals in cross-section \perp {110} (samples a –B-19, 6 – B-29, в – B-18), and \perp {111} (B-20).



Рис. 6. Агрегаты коричневого титанита с эгирином (Aeg) и калиевым полевым шпатом в пироксен-полевошпатовых пегматитах зоны 125: а – раздробленный и частично регенерированный в полосе деформации титанит; б – синтаксические срастания титанита с эгирином.

Fig. 6. Aggregate of brown titanite with aegirine (Aeg) and K-feldspar in pyroxene-feldspar pegmatites of zone 125: a - fragmented and partly regenerated titanite in a deformation band; 6 - syntactic intergrowths of titanite with aegirine.



Рис. 7. Срастания титанита с ильменитом и полевым шпатом в сиенитовом пегматите (а) и перекристаллизованый титанит в полосе деформации (б) карбонатит-пегматита с ильменитом (Ilm) из карьера на горе Долгой.

Fig. 7. Intergrowths of titanite with ilmenite and feldspar in syenite pegmatite (a) and recrystallized titanite in deformation band (6) of carbonatite-pegmatites from quarry of Mt. Dolgaya.



Рис. 8. Зональность и секториальность состава титанита в пегматитах Курочкина и Свистунова логов. Образцы: В-36 (а), В-45 (б), В-19 (в), В-54 (г). Аb – альбит, Ар – фторапатит, Fsp – калишпат, Cal – кальцит, Ttn – титанит, Ccn – канкринит, Hlg – хошелагаит, Zrn – циркон. BSE-фото: И.А. Блинов.

Fig. 8. Zoning and sectoriality of titanite composition in pegmatites from Kurochkin Log and Svistunov Log. Samples: B-36 (a), B-45 (δ), B-19 (B), B-54 (Γ). Ab – albite, Ap – apatite, Fsp – K-feldspar, Cal – calcite, Ttn – titanite, Ccn – cancrinite, Hlg – hochelagaite, Zrn – zircon. BSE-image: I.A. Blinov.

Неоднородности химического состава титанита

В работах, посвященных минералогии Вишневогорского комплекса, приводились химические анализы различного по составу титанита (Бонштедт-Куплетская, 1951; Еськова и др., 1964). Анализы проводились методом «мокрой химии», когда чистота мономинеральной пробы контролировалась под микроскопом при небольших увеличениях. Судя по анатомическим картинам сечений кристаллов титанита (рис. 5), при современных микрозондовых исследованиях также почти невозможно избежать в них минералов-включений. Впрочем, и при точечных исследованиях состава минералов возможны ошибки, если в минерале присутствуют наноразмерные («невидимые») включения. В вишневогорском титаните нередко зональность и (чаще) секториальность видны уже на BSE-снимках (рис. 8), особенно при добавлении им контраста. Вариация состава в зонах и пирамидах (секторах) нарастания граней разных простых форм кристаллов титанитов бывает малозаметна либо контрастна.

МИНЕРАЛОГИЯ 1(5) 2019

Неоднородности состава рассмотрим на примере титанита из нефелин-полевошпатовых (миаскитовых) пегматитов в миаскитах Курочкина Лога (кристаллы В-36, В-45 и В-19) и из сиенитового пегматита жилы 35 (кристалл В-54) на северо-западном склоне горы Долгой (рис. 8; табл.). Так, в кристаллах B-36 и B-45 в пирамиде роста призмы n {111} зоны, «темные» в обратно-рассеянных электронах, содержат немного больше Ті, Fe и V при меньших количествах Nb, Ce, Na и Ca относительно «светлых» участков зон (рис. 8а, б; табл., ан. 1-4). Та же тенденция характерна для Ti, Fe, Nb, Na и Са в образце В-19, где не выявлены Се и V (рис. 8в; табл., ан. 5, 6). Обратная тенденция наблюдается в кристалле В-54 из сиенитового пегматита, где более светлые участки титанита несколько обогащены REE, Fe, Ca и Al, но содержат меньше Na и Ti (рис. 8г; табл., ан. 7, 8).

В пирохлорсодержащих рудных телах примесь титанита иногда существенна (например, в зоне 125 титанита больше, чем пирохлора). При использовании старых методов обогащения пирохлора технологи не смогли добиться отделения его от титанита. Пришлось отказаться от добычных работ на таких участках. Для будущих технологических

Таблица

Химический состав (мас. %) титанита из миаскитового пегматита Курочкина Лога (1–6) и из сиенитового пегматита жилы 35 (7, 8)

Chemical composition (wt. %) of titanite of miaskitic pegmatite from Kurochkin Log (1–6), and syenitic pegmatite of vein 35 (7, 8)

№ ан.	Точка	Na.O	Al.O.	SiO.	CaO	TiO.	Fe.O.	Nb.O.	MnO	Ce.O.	Nd.O.	V.O.	Сумма	
	ан.	1.020	1 - 2 - 3	2102		1102	203	1.0205		203	1.0203	205	- Junio	
1	u	0.72	1.07	30.12	26.84	34.71	1.41	2.31	-	0.82	-	0.43	98.43	
2	v	0.65	1.00	30.03	26.43	35.26	1.49	2.26	_	0.71	-	0.51	98.34	
3	W	0.74	0.97	30.30	25.63	34.46	1.34	3.63	_	1.04	-	0.53	98.64	
4	х	0.61	1.23	30.82	26.09	34.65	1.59	2.51	_	0.90	_	0.71	99.11	
5	t	0.56	0.75	30.51	26.96	36.78	1.31	2.77	_	_	-	_	99.64	
6	s	0.35	0.78	30.58	27.50	37.20	1.33	1.80	-	_	-	_	99.54	
7	j	0.56	1.33	30.89	27.14	32.31	3.10	2.63	_	0.70	0.34	-	99.00	
8	k	1.11	0.81	30.66	26.54	34.26	1.90	2.78	0.32	0.28	-	_	98.66	
№ ан.	Расчётные формулы (на Si = 1)													
1	$(Ca_{0.95}Na_{0.05}Ce_{0.01})_{\Sigma 1.01}(Ti_{0.87}Fe^{3+}_{0.04}Al_{0.04}Nb_{0.03}V_{0.01})_{\Sigma 0.99}(SiO_4)O$													
2	$(Ca_{0.94}Na_{0.04}Ce_{0.01})_{\Sigma 0.99}(Ti_{0.88}Fe^{3+}_{0.04}Al_{0.04}Nb_{0.03}V_{0.01})_{\Sigma 1.00}(SiO_4)O$													
3	$(Ca_{0.91}Na_{0.05}Ce_{0.01})_{\Sigma 0.97}(Ti_{0.86}Fe^{3+}_{0.03}Al_{0.04}Nb_{0.05}V_{0.01})_{\Sigma 0.99}(SiO_4)O$													
4	$(Ca_{0.92}Na_{0.04}Ce_{0.01})_{\Sigma 0.97}(Ti_{0.86}Fe^{3+}_{0.04}Al_{0.05}Nb_{0.06}V_{0.02})_{\Sigma 1.03}(SiO_4)O$													
5	$(Ca_{0.95}Na_{0.04})_{\Sigma 0.99}(Ti_{0.91}Fe^{3+}_{0.03}Al_{0.03}Nb_{0.04})_{\Sigma 1.01}(SiO_4)O$													
6	$(Ca_{0.97}Na_{0.02})_{\Sigma 0.99}(Ti_{0.92}Fe^{3+}_{0.03}Al_{0.03}Nb_{0.03})_{\Sigma 1.01}(SiO_4)O$													
7	(Ca _{0.94}	$(Ca_{0.94}Na_{0.04}Ce_{0.01})_{\Sigma 0.99}(Ti_{0.79}Fe^{3+}_{0.08}Al_{0.05}Nb_{0.04})_{\Sigma 0.96}(SiO_4)O$												
8	(Ca _{0.92}	$(Ca_{0.92}Na_{0.07}Mn_{0.01})_{\Sigma1.00}(Ti_{0.83}Fe^{3+}_{0.05}Al_{0.03}Nb_{0.04})_{\Sigma0.99}(SiO_4)O$												

Примечание. Ан. 1, 2 – обр. В-36; ан. 3, 4 – обр. В-45; ан. 5, 6 – обр. В-19; ан. 7, 8 – обр. В-54. Точки анализа показаны на рис. 8. SEM Vega3 Tescan, аналитик И.А. Блинов

Note. 1, 2 – sample B-36; 3, 4 – sample B-45; 5, 6 – sample B-19; 7, 8 – sample B-54. Analysis numbers are shown in Fig. 8. SEM Vega3 Tescan, analyst I.A. Blinov.

разработок важно знать особенности химического состава в элементах анатомии кристаллов титанита и зависимость электретных свойств титанита (возникновение магнетизма при нагревании в электрическом поле) от его состава. Для постановки экспериментов необходимо представлять, с какими исходными титанитами можно встретиться в недрах Вишнёвых гор.

Заключение

Ретроспективное моделирование процессов минералообразования в Вишневогорском комплексе осуществлялось в разное время в рамках существующих научных парадигм. Наши предшественники (Бонштедт-Куплетская, 1951; Еськова и др., 1964; Левин и др., 1997) отнесли титанит преимущественно к метасоматическим объектам. В изученных нами случаях по морфологическим признакам титанит кристаллизовался одновременно или частично одновременно с породообразующими минералами. Парагенезисы и ассоциации титанитов Вишнёвых гор весьма разнообразны. Среди синхронных включений наблюдались полевые шпаты, амфиболы, пироксены, слюды, карбонаты, фосфаты, сульфаты, сульфиды, оксиды, галогениды. В трещинах и порах титанитов встречаются разные минералы поздних минерализаций и коры выветривания. Среди парагенезисов титанита самыми распространенными являются минералы магматических сиенитов, карбонатитов, слюдитов и пегматитов. В карьере жилы 35 титанит в пироксен-скаполит-гранатовом агрегате в жиле заполнения не может быть отнесен к метасоматическому скарну. Таким образом, метасоматического титанита в Вишнёвых горах либо мало, либо недостаточно специальных наблюдений. С химической точки зрения титанит можно считать конкурентом пирохлору по «усвоению» ниобия и редких земель из питающего расплава-раствора. Возможно, в будущем

при возобновлении добычных работ на ниобиевые руды, титанит также будет объектом обогащения для попутного извлечения титана, ниобия и редких земель.

Автор благодарен И.А. Блинову за электронно-микроскопические исследования минералов, А.М. Кузнецову и С.Ю. Крюкову за предоставленные образцы минералов, В.И. Поповой за содействие в исследованиях. Работа выполнена в рамках госбюджетной темы АААА-А17-117020250032-1 Института минералогии УрО РАН.

Литература

Амеландов А.С. (1929) Материалы к познанию нефелиновых пегматитов Каслинского района на Урале. *Известия Геолкома*, **48**(6), 148–155.

Бонштедт-Куплетская Э.М. (1951) Минералогия щелочных пегматитов Вишнёвых гор. М., АН СССР, 175 с.

Еськова Е.М., Жабин А.Г., Мухитдинов Г.Н. (1964) Минералогия и геохимия редких элементов Вишнёвых гор. М., Наука. 320 с.

Левин В.Я., Роненсон Б.М., Самков В.С., Левина И.А., Сергеев Н.С., Киселёв А.П. (1997) Щёлочнокарбонатитовые комплексы Урала. Екатеринбург, Уралгеолком, 274 с.

Попов В.А., Попова В.И., Блинов И.А., Котляров В.А. (2018) Цирконолит из щелочных пегматитов Вишнёвых гор: первые находки на Южном Урале. *Минералогия*, 4(3), 3–7.

References

Amelandov A.S. (1929) [Materials for understanding nephelinic pegmatites of Kasli district, Urals]. *Izvestiya Geolkoma* [News of Geological Committee], **48**(6), 148– 155. (in Russian)

Bonshtedt-Kupletskaya E.M. (1951) [Mineralogy of alkali pegmatites of the Vishnevye Mountains]. Moskva, AN SSSR, 175 p. (in Russian)

Es'kova E.M., Zhabin A.G., Mukhitdinov G.N. (1964) [Mineralogy and geochemistry of rare elements of the Vishnevye Mountains]. Moskva, Nauka, 320 p. (in Russian)

Levin V.I., Ronenson B.M., Samkov V.S., Levina I.A., Sergeev N.S., Kiselev A.P. (1997) [Alkaline-carbonatite complexes of the Urals]. Yekaterinburg, Uralgeolkom, 274 p. (in Russian)

Popov V.A., Popova V.I., Blinov I.A., Kotlyarov V.A. (2018) [Zirconolite of alkaline pegmatites of the Vishnevye Mountains]. *Mineralogiya [Mineralogy]*, **4**(3), 3–7. (in Russian)

Статья поступила в редакцию 19 февраля 2019 г.