



УДК 549.778.347:549.614

DOI: 10.35597/2313-545X-2024-10-3-1

О СОСТАВЕ И НЕЙТРОННО-АКТИВАЦИОННОЙ РАДИОГРАФИИ КРИСТАЛЛОВ ТОПАЗА ИЗ АВТОРСКОЙ КОЛЛЕКЦИИ

В.И. Попова, В.А. Попов, М.А. Рассомахин

*Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН,
г. Миасс, Челябинская обл., 456317 Россия; popov@mineralogy.ru*

Статья поступила в редакцию 14.04.2024 г., после доработки 20.05.2024 г., принята к печати 06.06.2024 г.

Аннотация. Состав зональных, зонально-секториальных или относительно однородных небольших кристаллов топаза из гранитных пегматитов Украины (Волянь) и России – из Ильменского заповедника (Южный Урал), Орловского и Шерловогорского месторождений (Забайкалье) и месторождения Забытого (Приморье) охарактеризован с помощью сканирующего электронного микроскопа с энергодисперсионным спектрометром и частично – методом лазерной масс-спектропии. Для некоторых топазов приведены фотоэкспозиции нейтронно-активационных радиографий с данными о химическом составе и возможных изотопах, формирующих изображение. По составу исследованные топазы подразделились на три типа: 1) преимущественно фтористые (58 %), 2) фтористо-гидроксильные (21 %), 3) преимущественно гидроксильные (21 %). Показано преимущество метода нейтронно-активационной радиографии для выявления картин зональной и зонально-секториальной неоднородности состава кристаллов топаза.

Ключевые слова: топаз, состав, радиография, Волянь (Украина), Урал, Забайкалье, Приморье (Россия).

Благодарности. Авторы благодарны В.И. Силаеву и А.Ф. Хазову за рациональные замечания.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанных с рукописью.

Вклад авторов. В.И. Попова, В.А. Попов – разработка концепции, исследование; М.А. Рассомахин – аналитические/экспериментальные работы; В.И. Попова, В.А. Попов – написание черновика рукописи, визуализация, редактирование финального варианта рукописи. Все авторы одобрили финальную версию статьи перед публикацией.

Для цитирования: Попова В.И., Попов В.А., Рассомахин М.А. О составе и нейтронно-активационной радиографии кристаллов топаза из авторской коллекции. Минералогия, **10**(3), 5–19. DOI: 10.35597/2313-545X-2024-10-3-1.

ABOUT THE COMPOSITION AND NEUTRON ACTIVATION RADIOGRAPHY OF TOPAZ CRYSTALS FROM AN AUTHOR'S COLLECTION

V.I. Popova, V.A. Popov, M.A. Rassomakhin

*South Ural Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass,
Chelyabinsk region, 456317 Russia; popov@mineralogy.ru*

Received 14.04.2024, revised 20.05.2024, accepted 06.06.2024

Abstract. The composition of zoned, zoned-sectorial or relatively homogeneous small topaz crystals from granite pegmatites of Ukraine (Volyn) and Russia (Ilmeny State Reserve in South Urals, Orlovskoe and Sherlovaya Gora deposits in Transbaikalia, and Zabytoe deposit in Primorye) is characterized using scanning electron microscope with energy-dispersive spectrometer and partly by laser mass spectroscopy.

Photoexpositions of neutron activation radiography with data on chemical composition and possible isotopes, which form the pattern, are presented for some topaz crystals. According to the composition, the studied topaz was subdivided on three types according: 1) mostly fluoride (58%); 2) fluoride-hydroxyl (21%); 3) mostly hydroxyl (21%). The advantage of the neutron activation radiography for detecting patterns of zoned and zoned-sectorial heterogeneity of the composition of topaz crystals is shown.

Keywords: topaz, composition, radiography, Volyn (Ukraine), Ural, Transbaikalia, Primorye (Russia).

Acknowledgements. We are grateful to V.I. Silaev and A.F. Khazov for rational comments.

Conflict of interest. The authors declare that they have no conflicts of interest.

Author contribution. V.I. Popova, V.A. Popov – conceptualization, investigation; M.A. Rassomakhin – analytical/experimental works; V.I. Popova, V.A. Popov – writing – original draft, visualization, writing – review & editing. All the authors approved the final version of the manuscript prior to publication.

For citation: Popova V.I., Popov V.A., Rassomakhin M.A. About the composition and neutron activation radiography of the topaz crystals from the author's collection. *Mineralogy*, **10**(3), 5–19. DOI: 10.35597/2313-545X-2024-10-3-1

ВВЕДЕНИЕ

Топазы в гранитоидных породах и пегматитах регионов мира охарактеризованы ранее в справочнике «Минералы» (1972, т. III, вып. 1), где химический состав топазов установлен силикатным и спектральным анализами. В последующие годы с усовершенствованием аналитической аппаратуры данные о топазах пополнялись многими исследователями (Платонов и др., 1984 и мн. др.). Условия нахождения топазов, вариации величины кристаллов, относительное постоянство содержаний главных химических компонентов и элементов-примесей и минеральных микровключений обобщены в справочнике «Типоморфизм минералов» (1989). Естественно, что лучшие по величине, форме, цвету и прозрачности кристаллы топаза пополняли музеи разных стран, исследовательских организаций, а также авторских коллекций.

Исследованная коллекция топазов была собрана нами с помощью коллег в процессе геолого-минералогических исследований 1974–1987 гг. из некоторых месторождений России и Украины. Ранее рентгенофлюоресцентным и спектральным методами и методом лазерной масс-спектрометрии (ЛМС) определены содержания элементов-примесей в топазах (Попов и др., 1992). В одном образце проанализирован изотопный состав Si (Быковский и др., 1987). В ростовых зонах некоторых образцов определен параметр ячейки b_0 топаза (Попова, Долгопят, 1989). Препараты топаза были облучены потоком тепловых нейтронов $1.58 \cdot 10^{11}$ н/см² · с в течение трех минут в канале 119 реактора ВВР-К в Институте ядерной физики АН КазССР в Алма-Ате (ныне – Алматы) с интервалом «охлаждения» (τ) от 5 мин. до 1.5 месяцев и более после облучения с последующими фотоэкспозициями (t_s) длительно-

стью от 15 с до 1.5–3 ч и более на стеклянных фотопластинках «Изоорто» (Попова, 1995). Интенсивно излучавшие участки топазов на радиографиях формировали темные зоны разной интенсивности, которые при печати на фотоснимках отражаются как светлые до белых, а менее излучавшие участки – темные до черных. Результаты изучения ростовой анатомии, выявленной методом нейтронно-активной радиологии, были дополнены данными неоднородности химического состава кристаллов топаза и приведены в настоящей статье.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе изучены избранные кристаллы топаза из: пегматитов Волыни (Украина) ($n = 4$), копей № 87 и № 411 в Ильменских горах на Южном Урале ($n = 3$), жил Орловского Та-Nb-месторождения в Забайкалье ($n = 3$), пегматитов Шерловой горы в Забайкалье ($n = 4$) и топаз-кварцевых жил месторождения Забытое в Приморье ($n = 7$) (рис. 1). Топазы из друзовых полостей жил разных месторождений обычно разнообразны по габитусу и комбинации форм. Среди исследованных топазов встречались кристаллы от длиннопризматических до «субизометричных» с гранями ромбических призм $m\{110\}$, $l\{120\}$, $f\{011\}$, $d\{101\}$, $p\{102\}$, $M\{230\}$, дипирамид $o\{111\}$, $u\{112\}$ и пинакоидов $c\{001\}$, $b\{010\}$ (рис. 2), а также с участками сложных индукционных поверхностей сокристаллизации с соседними кварцем, полевыми шпатами, слюдами, турмалином и другими минералами. Для исследования анатомии кристаллов использованы 19 плоских пластинок топаза толщиной до 5–10 мм в сечениях, параллельных или перпендикулярных оси $[001]$.

Химический состав топаза и минеральных включений в нем исследован в 2023 г. в Южно-

Уральском федеральном научном центре минералогии и геоэкологии УрО РАН (г. Миасс) с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Vega-3 Tescan с энергодисперсионным спектрометром (ЭДС) Oxford Instruments X-act (аналитик М.А. Рассомахин) и расчетом H_2O .

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Топазы Волыни

Топазы Волыни известны с первой половины XVIII в. в топаз-берилловых пегматитах среди гранитов Коростеньского плутона на северо-западе Украины (рис. 1). В дальнейшем при эпизодической отработке жил добывались коллекционные, ювелирные и технические топазы, разнообразные по величине, форме, цвету и прозрачности. Отмечались находки топазов весом до 100–150 кг; в 1965 г. в камере пегматита с топазами встречен крупный столбчатый кристалл топаза длиной 82 см, толщиной до 43 см и весом 117 кг (Сорокин и др., 1967).

Наиболее привлекательны зональные и зонально-секториальные полихромные кристаллы.

Один из примеров окраски разных пирамид роста по трем сечениям топаза Волыни (рис. 3) – голубой призмы $l\{120\}$, розовой призмы $m\{110\}$ и бесцветных пинакоида $b\{010\}$ и призмы $f\{011\}$ – приведен ранее (Леммлейн, Меланхолин, 1951; цвет дан нами). В другом кристалле топаза пирамида роста пинакоида $b\{010\}$ – розовая, призмы $l\{120\}$ – голубая (Леммлейн, 1948). Ранее указывалось (Бершов, 1970, Платонов, 1976 и др.), что предцентры окраски волынских топазов имеют радиационную природу с образованием комплексов $[Ti_{II}-O_4F_2]$ в голубых топазах и зонах, а комплексов $[Ti_{III}-O_4(OH,F)_2]$ и $[Ti_{III}-O_4(OH)_2]$ – в розовых топазах. Отмечалось также, что химический состав голубых и розовых топазов мало отличается, в основном, по содержанию фтора (Платонов и др., 1984).

Нами исследованы топазы в пластинках размером 4–6 см и толщиной ~1 см в срезе $\parallel(001)$, переданные К. Клопотовым в 1982 г. (отобранные, вероятно, из разных жил или полостей). Пластинки топазов прозрачные, с участками граней ромбических призм $m\{110\}$, $l\{120\}$ и розоватыми, голубоватыми, коричневатыми и бесцветными зонами и секторами. В одних кристаллах периферические зоны призмы m – розоватые, в других – голубоватые или



Рис. 1. Местонахождение объектов изученных топазов на Яндекс-карте.

1 – Волынь; 2 – Урал, Ильменские горы; 3, 4 – Забайкалье; 5 – Приморье.

Fig. 1. Location of the studied topaz objects on Yandex map.

1 – Volyn; 2 – Urals, Ilmeny Mountains; 3, 4 – Transbaikalia; 5 – Primorye.

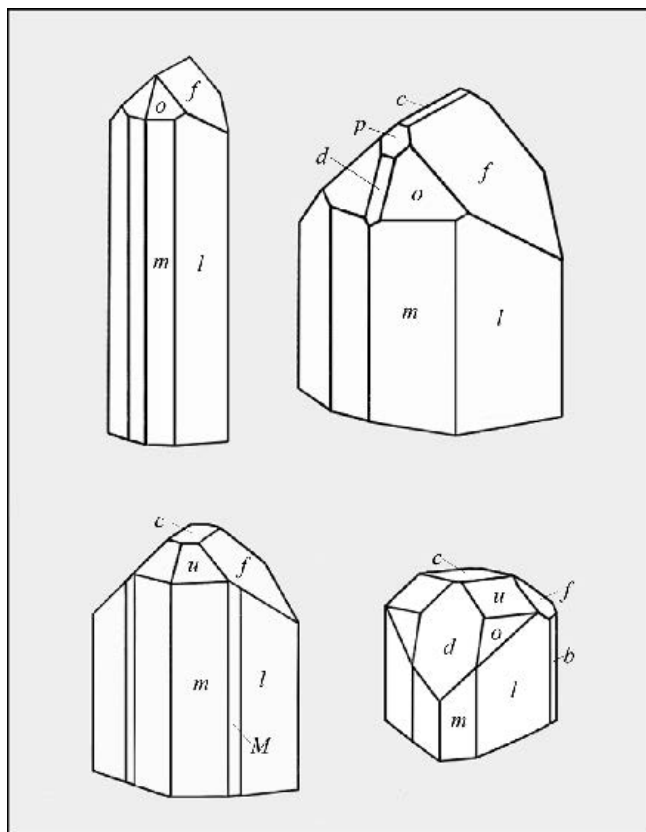


Рис. 2. Обычные формы исследованных кристаллов топаза (индексы форм описаны в тексте).

Fig. 2. Typical forms of the studied topaz crystals (indices of forms are described in text).

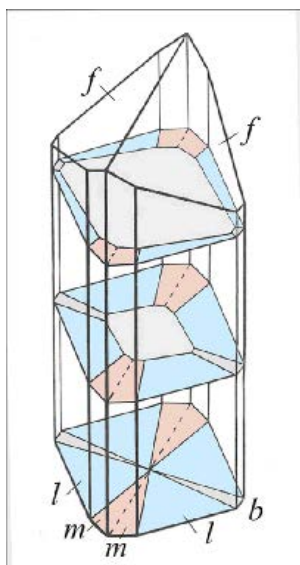


Рис. 3. Схема зонально-секториальной окраски во-лынского топаза в сечениях кристалла по (001).

Fig. 3. Scheme of zoned-sectorial color of the Volyn topaz in crystal sections along (001).

бесцветные, а зоны призмы l – розоватые или бесцветные (рис. 4).

После трех минут облучения реакторными нейтронами окраска топазов стала более интенсивной: розовые участки приобрели красный или фиолетово-красный цвет, голубоватые – ярко-голубой, а первично бесцветные – голубоватый. Зональность и секториальность топазов контрастно проявлена на фото последовательных радиографий (рис. 5), где наиболее активны светлые участки и зоны (исходный препарат № 52 позднее был обколот для анализов относительно формы образца на рис. 4в). Условия выполнения радиографий препаратов топаза: № 50 – τ 5 сут., t 6 ч.; № 51 – τ 15 мин., t 30 с.; № 52а – τ 17 мин., t 15 с.; № 52б – τ 14 мес., t 1.5 мес.; № 49а – τ 1 ч., t 1.5 мин.; № 49б – τ 5 суток, t 6 ч.

Результаты электронно-микроскопических исследований состава топаза были сопоставлены с картинками радиографий.

Топаз № 50. Полихромная пластина размером 6.5 см (рис. 4) после облучения была распиlena на две части (50а, 50б). В препарате 50а установлены следующие вариации состава, мас. %: Al_2O_3 55.87–56.62; SiO_2 32.31–33.05; F 8.18–9.15 с расчетом H_2O^* 1.53–3.09; Σ 99.98–100.01. Топаз розоватых зон сектора призмы m после облучения был менее активен (темный на рис. 5) с содержанием 8.18 мас. % F в периферической зоне роста d (рис. 6а), а в центральной части голубоватых активных зон f (светлых на рис. 5) призмы $f\{011\}$ – 8.22 мас. % F. Эмпирические формулы участков топаза (здесь и далее – расчет на Si = 1): а – $\text{Al}_{2.01}[\text{SiO}_4]\text{F}_{0.88}(\text{OH})_{1.15}$; б – $\text{Al}_{2.03}[\text{SiO}_4]\text{F}_{0.83}(\text{OH})_{1.26}$; с – $\text{Al}_{2.04}(\text{SiO}_4)[\text{F}_{0.85}(\text{OH})_{1.27}]$; д – $\text{Al}_2(\text{SiO}_4)[\text{F}_{0.79}(\text{OH})_{1.21}]$; е – $\text{Al}_{2.06}(\text{SiO}_4)[\text{F}_{0.82}(\text{OH})_{1.36}]$; ф – $\text{Al}_{2.03}(\text{SiO}_4)[\text{F}_{0.80}(\text{OH})_{1.29}]$.

В препарате 50б розоватые участки а, с, д (рис. 6б) содержат 8.29, 7.44 и 7.72 мас. % F, в голубоватом участке «б» – 8.48 мас. % F с эмпирическими формулами состава: а – $\text{Al}_{1.98}[\text{SiO}_4]\text{F}_{0.79}(\text{OH})_{1.15}$; б – $\text{Al}_{2.02}[\text{SiO}_4]\text{F}_{0.82}(\text{OH})_{1.24}$; с – $\text{Al}_2[\text{SiO}_4]\text{F}_{0.71}(\text{OH})_{1.29}$; д – $\text{Al}_2[\text{SiO}_4]\text{F}_{0.74}(\text{OH})_{1.21}$; е – $\text{Al}_{2.16}[\text{SiO}_4]\text{F}_{1.18}(\text{OH})_{1.30}$; ф – $\text{Al}_{2.05}[\text{SiO}_4]\text{F}_{0.86}(\text{OH})_{1.29}$. Участок е выделяется немного повышенными количествами F и Al (рис. 6б, в), что предположительно, связано с микробоком топаза другой ориентировки.

Топаз № 51. Крупная пластинка с голубоватой периферической зоной и внутренними розовыми зонами призмы $m\{110\}$ и небольшим розовым участком пирамиды роста призмы $l\{120\}$ (рис. 4) после облучения и фотопечати также распиlena на

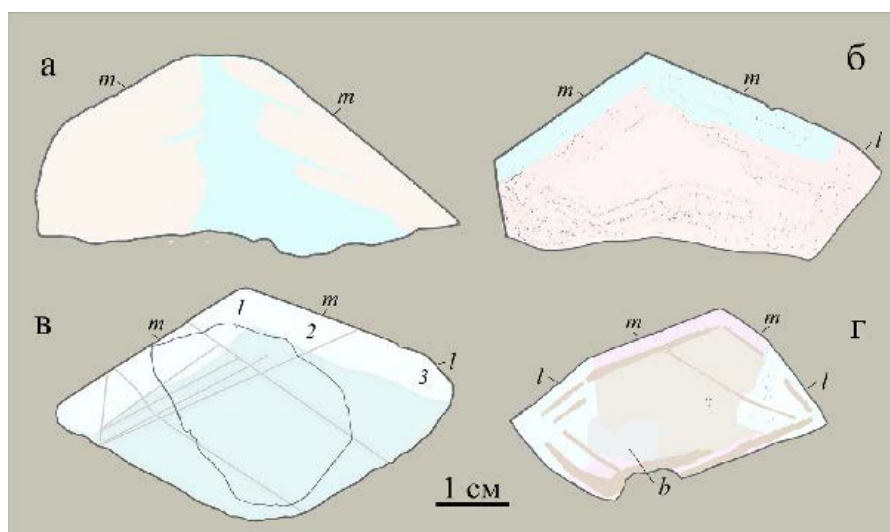


Рис. 4. Вид пластинок топазов Волыни до облучения: а – № 50; б – № 51; в – № 52 (показан контур препарата для электронного микроскопа); г – № 49.

Fig. 4. Plates of the Volyn topaz crystals before radiation: а – no. 50; б – no. 51; в – no. 52 (with contour of the specimen for SEM studies); г – no. 49.

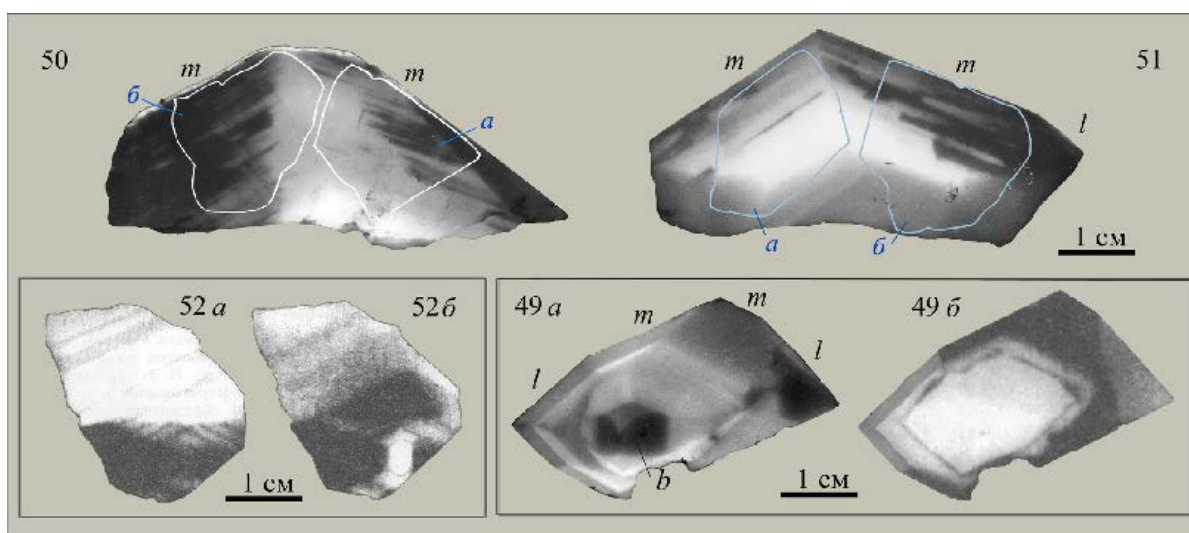


Рис. 5. Результат радиографии фрагментов зонально-секториальных топазов Волыни в сечении (001).

В кристаллах №№ 50 и 51 показаны контуры препаратов (а, б) для электронного микроскопа.

Fig. 5. Result of radiography of fragments of the Volyn zoned-sectorial topaz in section (001).

Contours of specimens for SEM studies are shown in crystals nos. 50 and 51 (а, б).

два препарата (рис. 5 и 7). Препараты 51а и 51б характеризуются следующими вариациями содержания (мас. %): Al_2O_3 56.28–57.01; SiO_2 30.84–31.82; F 12.31–15.98.

В препарате 51а периферическая голубоватая зона роста призмы m (рис. 4а) малоактивна (темная на фото радиографии рис. 5) с повышенным содержанием Al (рис. 4, участок б); внутренние светлые зоны (а, с) содержат меньше F. Эмпирические формулы состава разных участков топаза: а – $\text{Al}_{2.10}(\text{SiO}_4)[\text{F}_{1.29}(\text{OH})_{1.01}]$; б – $\text{Al}_{2.11}(\text{SiO}_4)[\text{F}_{1.35}(\text{OH})_{0.98}]$;

с – $\text{Al}_{2.13}(\text{SiO}_4)[\text{F}_{1.28}(\text{OH})_{1.11}]$; d – $\text{Al}_{2.11}(\text{SiO}_4)[\text{F}_{1.32}(\text{OH})_{1.01}]$.

В препарате 51б участок «а» характеризует состав розовой пирамиды роста призмы $l\{120\}$ с содержанием F 12.31 мас. %, а участки б–г – зон призмы $m\{110\}$ с голубоватой периферической зоной участка «е» и розовыми внутренними зонами – с 13.35–15.21 мас. % F (рис. 4, 7). Повышенными содержаниями F 15.98 и Al_2O_3 57.01 мас. % выделяется «саблевидный» микроблок г топаза. Составы разных участков топаза характеризуются формулами:

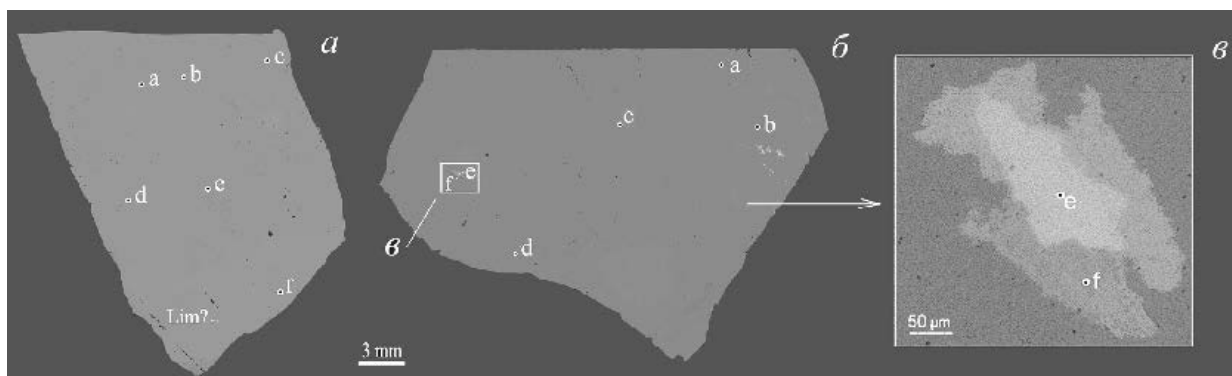


Рис. 6. СЭМ фото фрагмента кристалла топаза № 50 с участками анализов.

Fig. 6. BSE image of fragments of topaz crystal no. 50 with points of analyses.

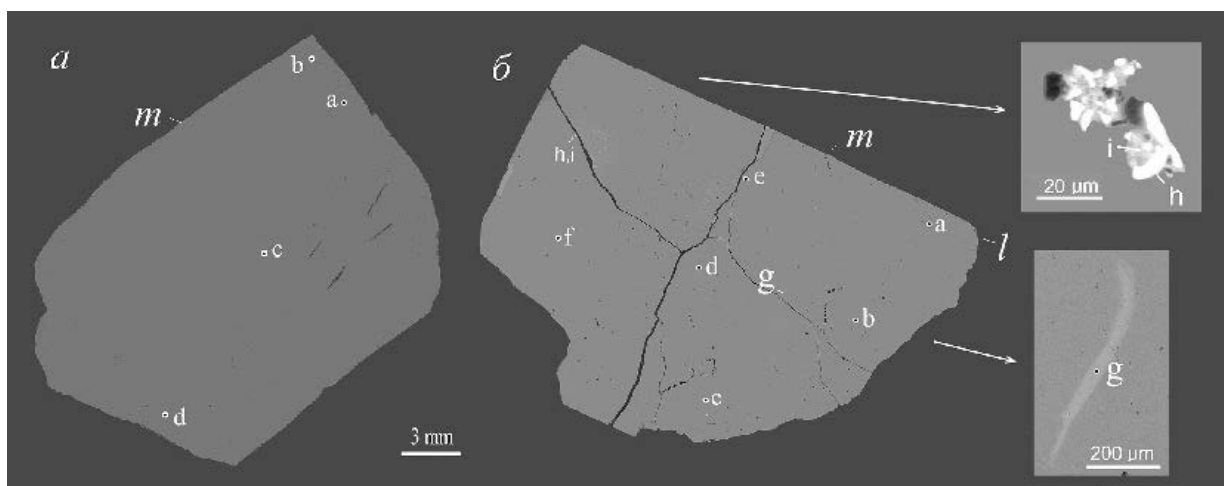


Рис. 7. СЭМ фото фрагмента кристалла топаза № 51 с участками анализов.

Fig. 7. BSE images of fragments of topaz crystal no. 51 with points of analyses.

$a - \text{Al}_{2.11}[\text{SiO}_4]\text{F}_{1.23}(\text{OH})_{1.10}$; $b - \text{Al}_{2.11}[\text{SiO}_4]\text{F}_{1.35}(\text{OH})_{0.98}$; $c - \text{Al}_{2.13}[\text{SiO}_4]\text{F}_{1.38}(\text{OH})_{1.01}$; $d - \text{Al}_{2.15}[\text{SiO}_4]\text{F}_{1.54}(\text{OH})_{0.91}$; $e - \text{Al}_{2.14}[\text{SiO}_4]\text{F}_{1.51}(\text{OH})_{0.91}$; $f - \text{Al}_{2.11}[\text{SiO}_4]\text{F}_{1.55}(\text{OH})_{0.78}$; $g - \text{Al}_{2.18}[\text{SiO}_4]\text{F}_{1.64}(\text{OH})_{0.90}$. В этом топазе встречено микроагрегатное включение (h, i) неизвестных гидроксидов Cs, Na и Rb с примесями Al, K, Ca (мас. %) (табл. 1).

Топаз № 52 – прозрачная голубоватая спайная пластинка с бесцветной периферической зоной призмы $m\{110\}$ (рис. 4в). После облучения потоком нейтронов окраска топаза изменилась: периферическая бесцветная зона призмы $m\{110\}$ приобрела голубой цвет с чередованием пяти зон разной интенсивности, а центральная (первично голубоватая) – стала пятнистой коричневато-розовой. Участки зон 1–3 исходного топаза № 52 (рис. 4в) были ранее исследованы в МИФИ методом ЛМС (Быковский и др., 1987). Для порошковых проб топаза из периферических зон $1m$ – призмы $m\{110\}$, $2l$

– призмы $l\{120\}$, $3f$ – призмы $f\{011\}$ получены эмпирические формулы: $1m - \text{Al}_{1.98}[\text{SiO}_4]\text{F}_{1.21}(\text{OH})_{0.73}$; $2l - \text{Al}_{1.99}[\text{SiO}_4]\text{F}_{1.12}(\text{OH})_{0.85}$; $3f - \text{Al}_{1.99}[\text{SiO}_4]\text{F}_{1.17}(\text{OH})_{0.80}$. Примеси K, Na, Ca и Fe, вероятно, обусловлены микровключениями полевого шпата.

В упомянутых зонах топаза № 52 определен изотопный состав Si (мас. %): в зоне $1m$ – ^{28}Si 88, ^{29}Si 8.0, ^{30}Si 4.0; в зоне $2l$ – ^{28}Si 88, ^{29}Si 8.4, ^{30}Si 3.6; в зоне $3f$ – ^{28}Si 89, ^{29}Si 7.2, ^{30}Si 3.8 (Быковский и др., 1987). По сравнению со средними данными для природного кремния (мас. %) – ^{28}Si 99.21; ^{29}Si 4.70; ^{30}Si 3.09 (Чупахин и др., 1972), в волынских топазах повышены содержания тяжелых изотопов Si.

На фотоснимке радиографии топаза (рис. 5а) после «охлаждения» в течение 17 минут с экспозицией 15 секунд средняя часть препарата более излучала (светлая), а его неоднородная нижняя часть была менее активна с темными зонами призмы $m\{110\}$ и секущим однородным участком пирами-

Таблица 1

Химический состав включений гидроксидов Cs, Na и Rb (мас. %) в топазе № 51b

Table 1

Chemical composition of inclusions of Cs, Na, and Rb hydrochlorides (wt. %) in topaz no. 51b

№ ан.	Na	K	Ca	Al	Cs	Rb	Cl	O	Сумма
h	6.63	0.56	1.24	1.71	40.13	5.76	30.02	13.05	99.10
i	8.21	7.99	—	0.81	14.57	19.99	37.13	4.52	93.22
Эмпирические формулы									
h	$(\text{Cs}_{0.36}\text{Na}_{0.35}\text{Rb}_{0.08}\text{Al}_{0.08}\text{Ca}_{0.04}\text{K}_{0.02})_{0.93}\text{Cl}_{1.02}(\text{OH})_{0.47}$								
i	$(\text{Na}_{0.81}\text{Rb}_{0.52}\text{K}_{0.26}\text{Cs}_{0.26}\text{Al}_{0.08})_{1.95}\text{Cl}_{2.37}$								

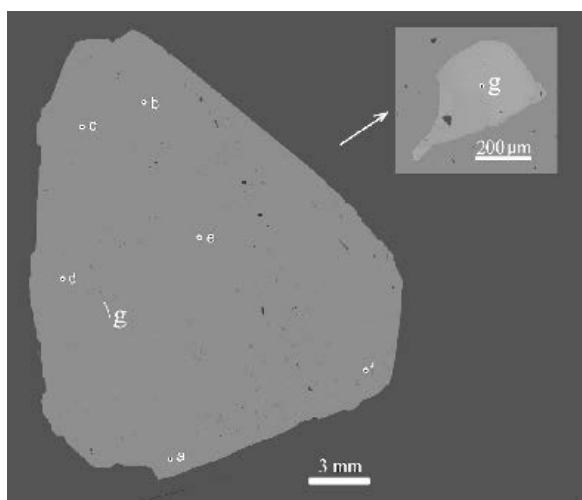


Рис. 8. СЭМ фото фрагмента кристалла топаза № 52 с участками анализов.

Fig. 8. BSE image of fragment of topaz crystal no. 52 with points of analyses.

ды роста пинакоида $b\{010\}$. Через 14 месяцев после облучения и наиболее длительной фотоэкспозиции 1.8 месяцев картина неоднородности топаза изменилась, особенно в его нижней части (рис. 5б), где более излучали внутренние («начальные») светлые зоны пирамид роста призм $f\{011\}$ и $m\{110\}$.

В химическом составе топаза выявлены вариации содержания компонентов (мас. %): SiO_2 30.85–31.52, Al_2O_3 56.14–57.15, F 13.64–14.55. Эмпирические формулы участков а–г (рис. 8): а – $\text{Al}_{2.11}[\text{SiO}_4]\text{F}_{1.37}(\text{OH})_{0.96}$; б – $\text{Al}_{2.17}[\text{SiO}_4]\text{F}_{1.48}(\text{OH})_{1.03}$; с – $\text{Al}_{2.12}[\text{SiO}_4]\text{F}_{1.39}(\text{OH})_{0.97}$; д – $\text{Al}_{2.12}[\text{SiO}_4][\text{F}_{1.38}(\text{OH})_{0.98}$, е – $\text{Al}_{2.13}[\text{SiO}_4]\text{F}_{1.41}(\text{OH})_{0.98}$; ф – $\text{Al}_{2.12}[\text{SiO}_4]\text{F}_{1.52}(\text{OH})_{0.84}$; г – $\text{Al}_{2.18}[\text{SiO}_4]\text{F}_{1.47}(\text{OH})_{1.07}$.

Топаз № 49 в сечении $\sim[001]$ прозрачного кристалла – полихромный с коричневым центральным участком и периферическими бледно-розовыми зонами пирамид роста призм $m\{110\}$, включающих тонкие светло-коричневые зоны

(рис. 4г). В голубоватых и коричневатых зонах роста призмы $l\{120\}$ особо выделяется «ядро» кристалла – почти бесцветный сероватый участок пирамиды роста пинакоида $b\{010\}$. После облучения реакторными нейтронами фотографии последовательных радиографий топаза через 19 минут и 5 суток существенно отличаются картинами и интенсивностью излучения разных зон (рис. 5, кристалл 49а, б). В порошковых пробах разных участков топаза методом ЛМС определены вариации содержания элементов, мас. %: Al 24–25, Si 14–15, F 14.8–15.5, O 41–42 и микропримеси Fe, Ti, Na, Mg (препарат не сохранился и на СЭМ не исследован). По данным ЛМС анализов, эмпирические формулы топаза разных зон относительно близки при дефиците фтора: зона пинакоида $b\{010\}$ – $\text{Al}_{1.98}[\text{SiO}_4]\text{F}_{0.80}(\text{OH})_{1.14}$, внутренняя зона роста призмы $m\{110\}$ – $\text{Al}_{2.01}[\text{SiO}_4]\text{F}_{0.84}(\text{OH})_{1.19}$, периферическая ее зона – $\text{Al}_2[\text{SiO}_4]\text{F}_{0.75}(\text{OH})_{1.25}$; внутренняя зона роста призмы $l\{120\}$ – $\text{Al}_{2.02}[\text{SiO}_4][\text{F}_{1.04}(\text{OH})_{1.02}$, а периферическая зона – $\text{Al}_{2.06}[\text{SiO}_4]\text{F}_{0.78}(\text{OH})_{1.40}$.

Топазы Ильменских гор

Топазы в Ильменских горах на Южном Урале выявлены во второй половине XVIII в. при добыче мусковита из пегматитов; в 1777–1780 гг. встречались топазы весом до 2–3 кг. Позднее топазы найдены в ряде жил амазонитовых и некоторых безамазонитовых гранитных пегматитов, иногда до 10–30 см величиной (Минералы..., 1949; Попов, Попова, 2006). Более обычны бесцветные прозрачные или замутненные кристаллы топаза величиной до 2–3 см, реже встречаются голубоватые или желтоватые. При расчистке копеек находили и крупные полихромные зональные топазы. Так, в копи № 247 добыты кристаллы величиной до 5–10 см с розовой внутренней частью и периферической голубо-

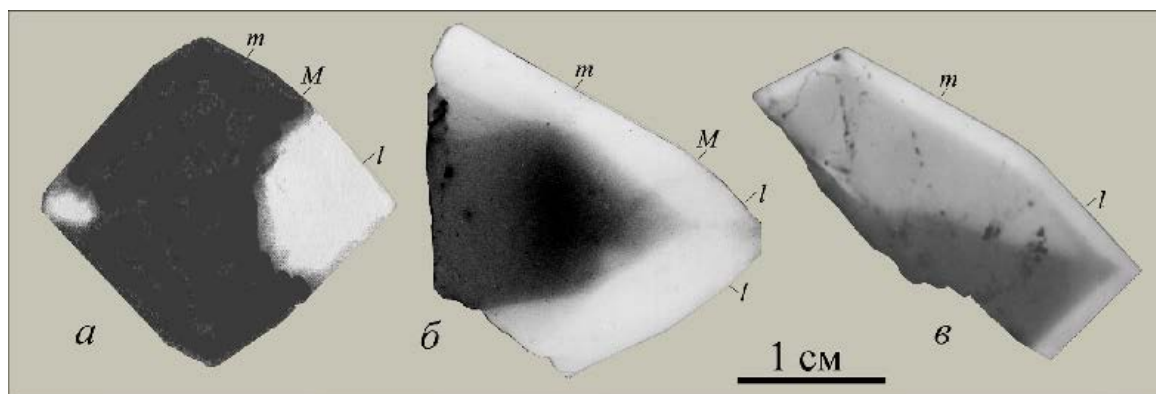


Рис. 9. Результат радиографии фрагментов секториальных и зонально-секториальных кристаллов топаза из копей №№ 50 (а), 87 (б) и 411 (в).

Fig. 9. Result of radiography of fragments of sectorial and zoned-sectorial of topaz crystals from mines nos. 50 (a), 87 (б) и 411 (в).

ватой зоной (Макагонов, 1980). Бесцветные топазы величиной 2.0–2.5 см из друзовых полостей амазонитовых пегматитов копей № 50 (Блюмовской) и № 87 (Лобачевской) на юге Ильменского заповедника, а также из копи № 411 в 2-х км СЗ оз. Таткуль (в северной части заповедника), полученные ранее от В.О. Полякова, после облучения не изменили цвета, а на фотоснимках радиографий в сечении $\sim(001)$ после трех минут облучения в реакторе проявились их контрастная зональность и секториальность (рис. 9).

Топаз из Блюмовской копи № 50 (рис. 9а) в сечении $\perp[001]$ в порошковых пробах из центральной части препарата по данным ЛМС содержит 16.6 мас. % F, из пирамиды роста призмы $l\{120\}$ – 18 мас. % F (препарат не сохранился и полнее не исследован).

Топазы из копей №№ 87 и 411 (рис. 9б, в) после облучения нейтронами приобрели зонально-секториальную неоднородность. Химический состав участков (рис. 10) немного отличается (мас. %): SiO_2 31.59–32.05, Al_2O_3 56.39–56.93, F 11.44–13.29. Эмпирические формулы топаза № 141 из копи № 87 (рис. 9а): а – $\text{Al}_{2.09}[\text{SiO}_4]\text{F}_{1.16}(\text{OH})_{1.11}$, б – $\text{Al}_{2.07}[\text{SiO}_4]\text{F}_{1.31}(\text{OH})_{0.90}$, с – $\text{Al}_{2.12}[\text{SiO}_4]\text{F}_{1.32}(\text{OH})_{1.04}$. В топазе выявлены микровключения торита d – $(\text{Th}_{0.66}\text{Ce}_{0.18}\text{La}_{0.05}\text{Nd}_{0.05}\text{Ca}_{0.03}\text{Pr}_{0.01})_{0.98}[\text{SiO}_4]_{0.65}[\text{PO}_4]_{0.35}$ и шерла е – $\text{Na}_{1.06}(\text{Fe}_{2.83}\text{Mn}_{0.13}\text{Zn}_{0.07}\text{Ti}_{0.06})_{3.09}\text{Al}_6(\text{BO}_3)_3(\text{Si}_{5.97}\text{Al}_{0.03}\text{O}_{18})(\text{OH})_4$.

Топаз № 58 из копи № 411 в периферических зонах роста призм $l\{120\}$ и $m\{110\}$ характеризуется разным составом участков (рис. 10б) с эмпирическими формулами:

а – $\text{Al}_{2.13}[\text{SiO}_4]\text{F}_{1.38}(\text{OH})_{1.01}$; б – $\text{Al}_{2.09}[\text{SiO}_4]\text{F}_{1.18}(\text{OH})_{1.09}$; с – $\text{Al}_{2.07}[\text{SiO}_4]\text{F}_{1.11}(\text{OH})_{1.10}$; д – $\text{Al}_{2.10}[\text{SiO}_4]\text{F}_{1.14}(\text{OH})_{1.16}$.

Топазы Забайкалья

Топазы Забайкалья известны с XVIII в. (Кулибин, 1829; Ферсман, 1962; Загорский и др. (1999) и активно добывались по 2000 г. и позднее. Известно, что в 1839 г. был найден голубоватый прозрачный топаз весом 11 кг, а в 1840 г. – кристалл просвечивающего винно-желтого топаза весом 31 кг (Ферсман, 1962), переданный позднее в Музей Санкт-Петербургского государственного университета. Нами в 1980–1982 гг. были отобраны и исследованы кристаллы топаза из жил Орловского Li-Ta-Nb-месторождения, локализованного в Западном массиве Борщовочного кряжа, и из жил в топазо-кварцевых грейзенах Шерловой горы восточной части гранитного массива Адун-Челон в Восточном Забайкалье (рис. 1).

Орловское месторождение в грейзенизированных литий-фтористых гранитах Западного массива Хангилайского плутона в 1960–1980 гг. отрабатывалось карьером, в уступах которого были вскрыты амазонит-кварцевые жилы с топазом, Li-F-слюдами и танталониобатами (Беус, Залашкова, 1965; Попова, Попов, 1982). Исследованные нами бесцветные прозрачные кристаллы топазов размером до 2.5 см после облучения реакторными нейтронами в течение трех минут остались бесцветными и прозрачными с кратковременной голубоватой люминесценцией. На фотоснимках радиографий кристаллы №№ 136 и 138 в сечении $\sim(100)$ зональны и секториальны с активной периферической светлой зоной роста призмы m (рис. 11а, б), а в сечении $\sim(010)$ обломка кристалла № 139 более активны были средние зоны роста призм $l\{120\}$ и $f\{011\}$ (рис. 11в).

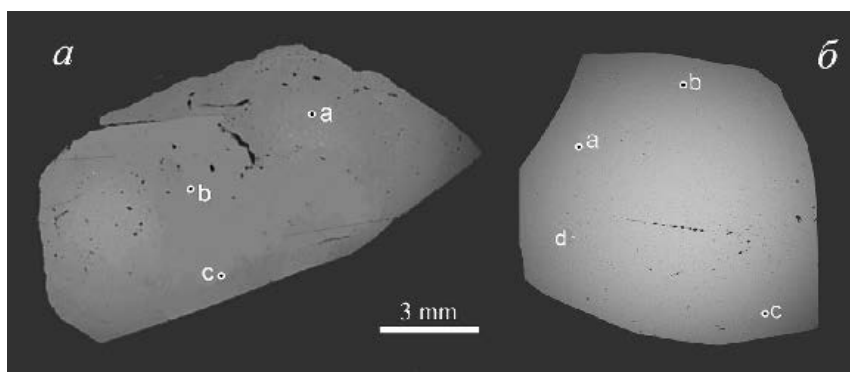


Рис. 10. СЭМ фото фрагментов кристаллов топаза № 141 (а) и № 58 (б) из гранитных пегматитов Ильменского государственного заповедника с участками анализов.

Fig. 10. BSE image of fragments of topaz crystals no. 141 (a) and no. 58 (b) from granite pegmatites of the Ilmeny State Reserve.

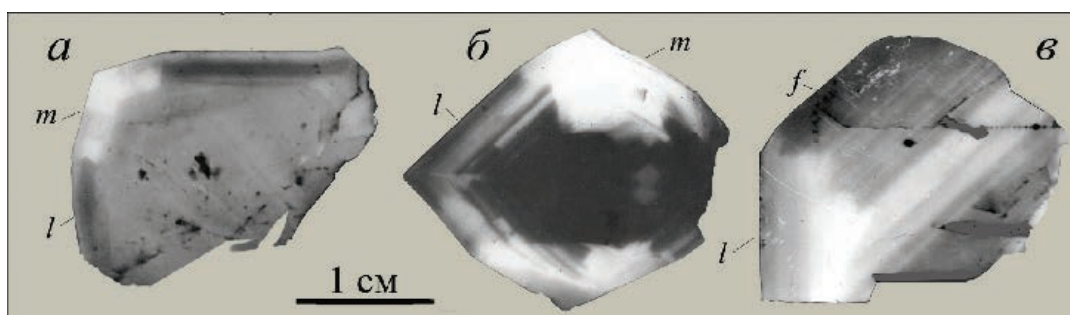


Рис. 11. Результат радиографии фрагментов кристаллов топаза №№ 136 (а), 138 (б) и 139 (в) Орловского месторождения.

Fig. 11. Result of radiography of fragments of topaz crystals nos. 136 (a), 138 (b), and 139 (в) from the Orlovskoe deposit.

Кристаллы топаза (рис. 12) характеризуются следующими вариациями содержания компонентов, мас. %: Al_2O_3 56.19–56.97; SiO_2 31.79–32.44; F 10.21–11.14.

Топаз № 136 в разных участках (рис. 12а) характеризуется близким составом с формулами: а – $\text{Al}_{2.06}[\text{SiO}_4]\text{F}_{1.09}(\text{OH})_{1.09}$ – в периферической зоне призмы $l\{120\}$; б – $\text{Al}_{2.06}[\text{SiO}_4]\text{F}_{1.08}(\text{OH})_{1.10}$ – в периферической зоне призмы $m\{110\}$; с – $\text{Al}_{2.09}[\text{SiO}_4]\text{F}_{1.10}(\text{OH})_{1.17}$ – центр препарата. Стенки полости трещины (е) шириной ~1 мм регенерированы микрокристаллами топаза согласно ориентировке матрикса.

Топаз № 137 (рис. 12б) в участках а–д характеризуется близким составом с формулами: а – $\text{Al}_{2.07}[\text{SiO}_4]\text{F}_{1.08}(\text{OH})_{1.13}$ – в периферической зоне призмы $f\{011\}$; б – $\text{Al}_{2.08}[\text{SiO}_4]\text{F}_{1.0}(\text{OH})_{1.24}$ – в зоне призмы $u\{112\}$ в центре препарата; с – $\text{Al}_{2.07}[\text{SiO}_4]\text{F}_{1.02}(\text{OH})_{1.19}$ и д – $\text{Al}_{2.08}[\text{SiO}_4]\text{F}_{1.00}(\text{OH})_{1.24}$ – в периферических участках призмы $u\{112\}$.

Топаз № 138 (рис. 11б) исследован методом ЛМС в порошковых пробах из зон призм $m\{110\}$ и $l\{120\}$ с расчетными формулами состава: $m\{110\}$

– $(\text{Al}_{1.84}\text{Fe}_{0.06}\text{Ti}_{0.04})_{1.94}[\text{SiO}_4]\text{F}_{0.98}(\text{OH})_{0.84}$; $l\{120\}$ – $(\text{Al}_{1.88}\text{Fe}_{0.04}\text{Ti}_{0.03})_{1.95}[\text{SiO}_4]\text{F}_{1.14}(\text{OH})_{0.71}$. Выявленные в топазе примеси Mg, Li и Rb, вероятно, обусловлены микровключениями турмалина.

Топазы Шерловой горы переданы нам К. Клопотовым и исследованы в сечении (001) трех прозрачных голубоватых до бесцветных кристаллов размером 1.5–2.3 см из бериллсодержащих топаз-кварцевых жил «Разведки Поднебесных» в грейзенизированных литий-фтористых порфировидных гранитах. После облучения в реакторе голубоватый кристалл № 53 изменил цвет на розовато-голубоватый, а бесцветный кристалл № 55 приобрел голубоватую окраску.

Топаз № 53 после облучения реакторными нейтронами на последовательных радиографиях характеризуется разной интенсивностью излучения зон. После «охлаждения» в течение 19 минут и экспозиции в течение 20 секунд внутренние светлые зоны топаза были более активны (рис. 13а), а на позднем фотоснимке (после «охлаждения» в течение 8 час. 15 мин. и экспозиции в течение 1.5 часа) проявилась их контрастная зонально-сек-

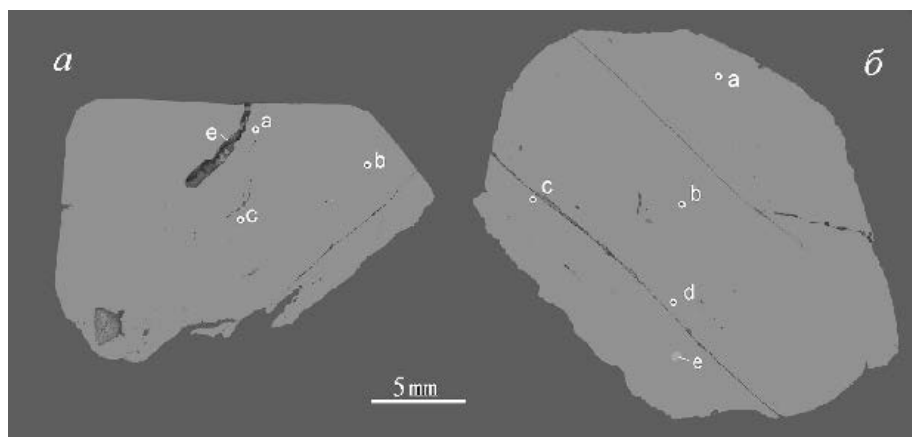


Рис. 12. СЭМ фото фрагментов кристаллов топаза № 136 (а) и № 137 (б) Орловского месторождения с участками анализа.

Fig. 12. BSE image of fragments of topaz crystals nos. 136 (a) and 137 (b) of the Orlovskoe deposit with points of analyses.

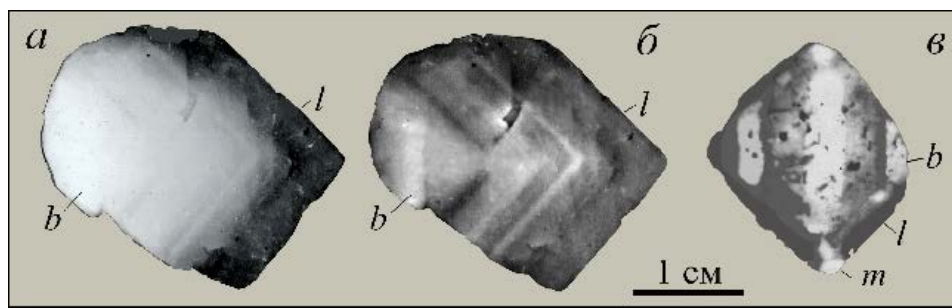


Рис. 13. Результат радиографии фрагментов кристаллов топаза № 53 (а, б) и № 55 (в) в сечении (001) из жил Шерловой Горы.

Fig. 13. Result of radiography of fragments of topaz crystals nos. 53 (a, б) and № 55 (в) in section (001) from the Sherlovaya Gora veins.

ториальная неоднородность (рис. 13б), включая и внутреннюю активную светлую зону пинакоида $b\{010\}$. Препарат не сохранился (не исследован на СЭМ).

Топаз № 55 – неоднородно-зональный с обилием микровключений и пор с активно-излучающими светлыми участками зон призмы $m\{110\}$ и пинакоида $b\{010\}$ на снимке радиографии (рис. 13в). Вариации содержания компонентов в топазе № 55 (рис. 14а) составили (мас. %): Al_2O_3 56.01–56.79; SiO_2 31.05–31.43; F 13.67–14.78; Σ 101.89–101.97. Эмпирические формулы состава участков топаза: а – $\text{Al}_{2.13}[\text{SiO}_4]\text{F}_{1.38}(\text{OH})_{1.01}$ – в периферической зоне призмы $m\{110\}$; б – $\text{Al}_{2.14}[\text{SiO}_4]\text{F}_{1.47}(\text{OH})_{0.95}$ – в центральном участке кристалла; с – $\text{Al}_{2.13}[\text{SiO}_4]\text{F}_{1.51}(\text{OH})_{0.88}$ – в периферической зоне пинакоида $b\{010\}$.

В этом топазе выявлено микровключение циркона с вариациями содержания HfO_2 0.64–2.35 мас. % и эмпирическими формулами состава: на участках d – $(\text{Zr}_{0.99}\text{Hf}_{0.01})[\text{SiO}_4]$ – в центре зерна; е –

$(\text{Zr}_{1.0}\text{Hf}_{0.01})[\text{SiO}_4]$ – на периферии его; f – $(\text{Zr}_{0.97}\text{Hf}_{0.02})[\text{SiO}_4]$ – в участке «зоны обрамления».

Топаз № 56 размером 1.5 см прозрачный, бледно-голубоватый в сечении $\sim(001)$, с тончайшими трещинками (рис. 14б), частично заполненными желтой глиной. Вариации состава топаза разных участков относительно близки со следующими расчетными формулами: а – $\text{Al}_{2.06}[\text{SiO}_4]\text{F}_{1.07}(\text{OH})_{1.11}$; б – $\text{Al}_{2.07}[\text{SiO}_4]\text{F}_{1.06}(\text{OH})_{1.15}$; с – $\text{Al}_{2.06}[\text{SiO}_4]\text{F}_{1.11}(\text{OH})_{1.07}$; d – $\text{Al}_{2.08}[\text{SiO}_4]\text{F}_{1.06}(\text{OH})_{1.18}$.

Топазы Сихотэ-Алиня

Исследованы топазы из месторождения Забытое (Сихотэ-Алинь), открытого в 1952 г. геологами Э.М. Размахниной и Ю.Н. Размахниным по свалам вольфрамит-полевошпат-кварцевых жил в крутом правобережье р. Иман (ныне – р. Большая Уссурка). Топазы в нем указаны среди аксессуарных минералов В.Т. Шацкой (Заболотная и др., 1962). Субмеридиональные крутопадающие свиты топазсодержа-

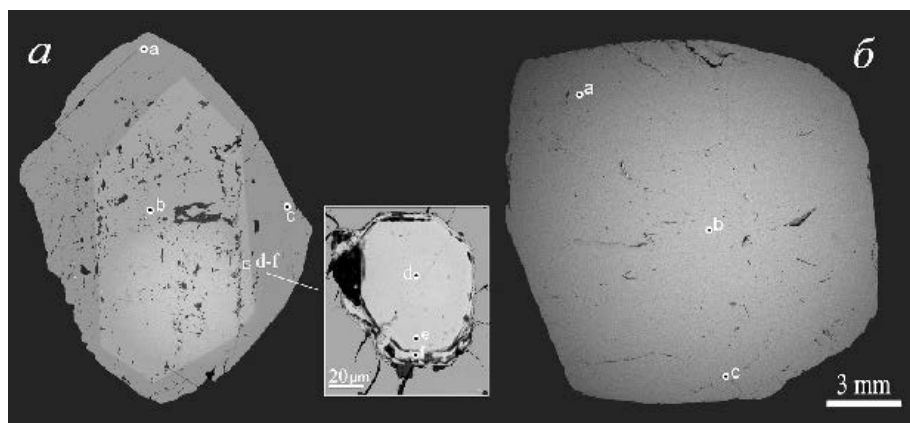


Рис. 14. СЭМ фото фрагментов кристаллов топаза № 55 (а, с включением циркона) и № 56 (б).
Fig. 14. BSE image of fragments of topaz crystals no. 55 (a, with zircon inclusion) and no. 56 (b).

щих кварцевых жил (с запада на восток) – Искра, Майская, Кварцевая, Ануш, Василинка, Озорная, Зеленая, Голубая, Лучистая – залегают в грейзенизированных осадочных породах (C_1) и гранитоидах Приискового массива (Гвоздев и др., 1990). Нами они были обследованы в 1986–1987 гг. с обобщением и дополнением характеристики минералов (Попов и др., 1992). В наиболее доступной штольне № 2 зоны Майской в жилах грейзеновой стадии характерны небольшие субизометричные до столбчатых кристаллы топаза в агрегатах с кварцем, касситеритом, вольфрамитом, Li-содержащими слюдами, бериллом, альбитом, сульфидами и другими минералами. В друзовых полостях крупных жил отмечались кристаллы топаза размером до 7–8 см. Среднее содержание топаза в зоне Майской составляет ~7 % объема (по технологической пробе № 2).

Нами отобрано 16 кристаллов топаза с помощью техников-геологов Г. Барыгиной, С. Садкина и С. Цуцара из ряда последовательных жил: 1) циннвальдит-кварцевых с вольфрамитом, бериллом, касситеритом и сульфидами Mo, Zn, Cu и Fe; 2) берилл-кварцевых с вольфрамитом и сульфидами Mo и Bi; 3) топаз-кварцевых с вольфрамитом, касситеритом, арсенопиритом и станнином; 4) топаз-кварцевых с вольфрамитом и сульфидами Fe и Zn; 5) топаз-кварцевых с мусковитом, флюоритом и сульфидами Fe и Zn. Эти нередко пересекающиеся жилы оказались близкими по минеральному составу вследствие частого трещинообразования и раскрытия разнонаправленных полостей.

Кристаллы топаза из жил зоны Майской короткопризматические до длиннопризматических с габитусными гранями призм $m\{110\}$, $l\{120\}$, $f\{011\}$, меньшими – $d\{101\}$, $o\{111\}$ и редкими –

пинакоидов $c\{001\}$, $b\{010\}$. На кристаллах топазов обычны участки индукционных поверхностей сокристаллизации с кварцем и другими минералами. В друзовых полостях жил преобладают прозрачные бесцветные или зональные голубоватые топазы с бесцветными и розоватыми зонами, реже – желтоватые, а также полихромные зонально-секториальные кристаллы с голубоватыми пирамидами роста граней $l\{120\}$, $f\{011\}$ и желтовато-розоватыми – $m\{110\}$ (рис. 15).

Плоскопараллельные препараты топаза толщиной до 1 см после облучения реакторными нейтронами с 2/3 тепловых изменили окраску или ее интенсивность, а фотоснимки радиографий оказались контрастно зональными и зонально-секториальными (рис. 16): В бесцветных прозрачных кристаллах (№ 34, 37-1, 37-2, 79) проявилась секториальность окраски: пирамиды роста призм $l\{120\}$ и $f\{011\}$ розовато-голубоватые; $m\{110\}$ и $b\{010\}$ – розоватые или розовато-коричневые, $d\{101\}$ – розоватые;

Полихромные полупрозрачные кристаллы (№ 80 и № 45) с первично однородными голубоватыми секторами призм $f\{011\}$, $d\{101\}$, дипирамиды $o\{111\}$ и розоватыми $m\{110\}$ после облучения секторы призм f , d , o приобрели более интенсивный розовато-голубоватый цвет, а призмы $m\{110\}$ – розовато-коричневатый. Неоднородный серовато-голубоватый топаз № 44 изменил окраску на розовато-коричневатую.

В исходных образцах топазов и некоторых плоскопараллельных препаратах встречены включения сингенетичных минералов: в топазе № 34 – вольфрамита $(Fe,Mn)WO_4$ размером до 5 мм и более мелкие включения касситерита SnO_2 и кварца. В топазе № 37-б обнаружены микровключения мускови-

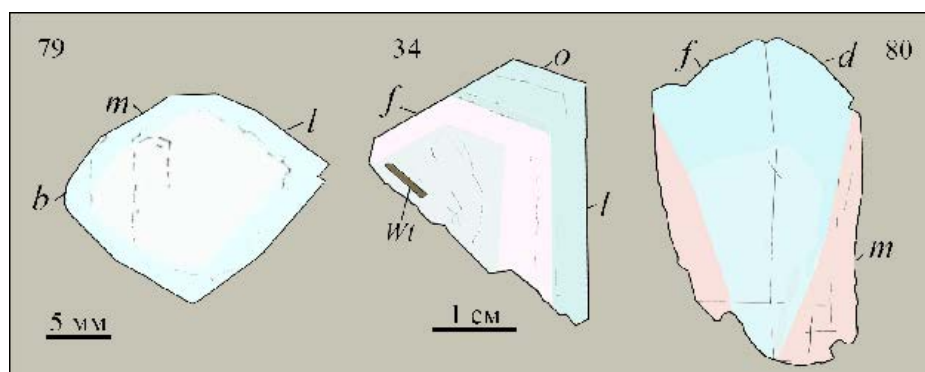


Рис. 15. Зарисовка цветовой зональности топазов месторождения Забытое.
 Fig. 15. Sketch of color zonation of topaz of the Zabytoe deposit.

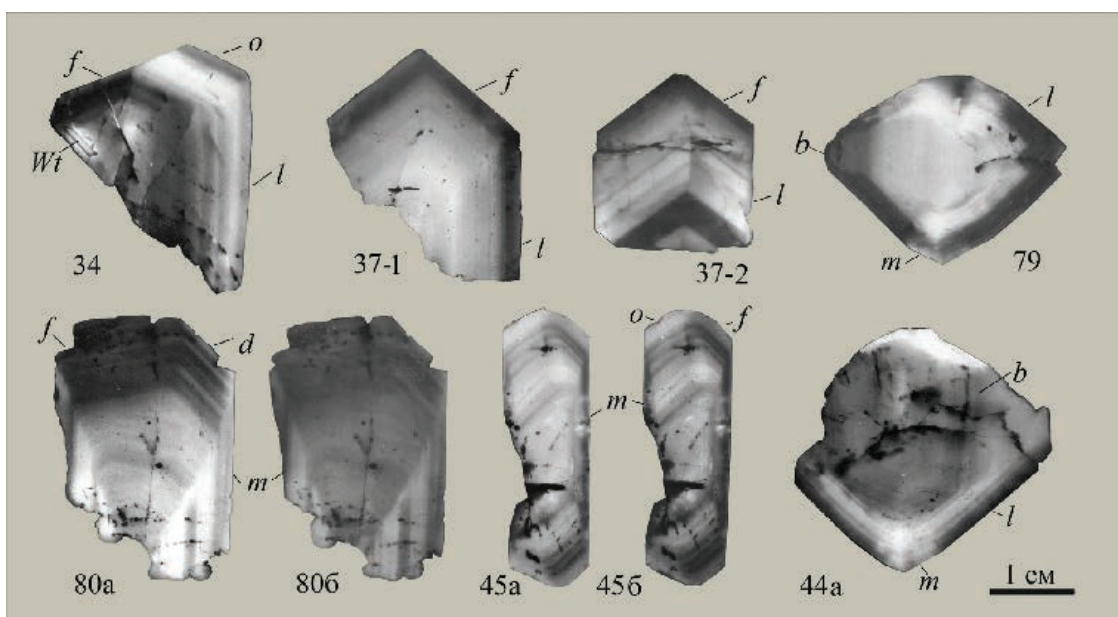


Рис. 16. Результат радиографии сечений фрагментов зонально-секториальных топазов из жил зоны Майская.
 Wt – включение вольфрамит.
 Fig. 16. Result of radiography of sections of fragments of zoned-sectorial topaz from veins of the Mayskaya zone.
 Wt – wolframite inclusion.

та состава $(K_{0.91}Na_{0.03}Fe_{0.03}Mn_{0.02}Ca_{0.01})Al_2[Si_{3.24}Al_{0.76}](OH)_{1.64}F_{0.35}$ и флюорита CaF_2 . В топазах № 44а и № 45 выявлены микровключения мусковита, железистого сфалерита ZnS и висмутина Bi_2S_3 . В препаратах № 79 и 80 отмечены поздние гидрослюды, локализованные в микрокавернах и трещинах.

Состав порошковых проб активированных реакторными нейтронами контрастно-зональных и секториальных топазов по данным ЛМС характеризуется следующими вариациями содержаний элементов, мас. %: Al 27.5–28.3, Si 15.4–16.1, F 15.1–19.6, O 41–42, K 0.05–0.12, Na 0.04–0.06, Ca 0.02–0.06, Fe 0.06–0.19, Ti 0.04–0.09, Ge 0.006–0.026.

На фотоснимках радиографии разных сечений кристаллов топаза различаются интенсивностью излучения и количеством зон (рис. 16).

В топазе № 34 состав более излучавшей предпоследней светлой зоны роста призмы $o\{111\}$ характеризуется формулой $(Al_{1.98}Ti_{0.01}Fe_{0.01})_2[SiO_4]F_{1.11}(OH)_{0.89}$, а топаз малоактивной периферической зоны призмы $f\{011\}$ – формулой $(Al_{1.98}Fe_{0.01}Ti_{0.01})_2[SiO_4]F_{1.06}(OH)_{0.94}$. В топазе № 37-1 интенсивность излучения постепенно уменьшалась от внутренних светлых зон к периферическим малоактивным темным зонам призм $l\{120\}$ и $f\{011\}$, где наименее активна была зона роста призмы $l\{120\}$.

Таблица 2

Вариации состава валентных анионов в исследованных топазах

Table 2

Variations in the composition of valence anions in the studied topazes

Регионы	№ обр.	F/OH отношение	Тип топазов по составу валентных анионов
Волынь	49	0.73 ± 0.25	Преимущественно гидроксильный
	50	0.66 ± 0.05	
	50в	0.63 ± 0.12	
	51а	1.28 ± 0.10	Преимущественно фтористый
	51в	1.57 ± 0.30	
	52	1.49 ± 0.15	
Ильменские горы	58	1.11 ± 0.18	Преимущественно фтористый
	141	1.26 ± 0.20	
Забайкалье (Орловка)	136	0.97 ± 0.03	Промежуточный фтористо-гидроксильный
	137	0.86 ± 0.07	
	138	$1.17-1.61$	Преимущественно фтористый
Забайкалье (г. Шерловая)	55	1.54 ± 0.18	
	56	0.96 ± 0.06	Промежуточный фтористо-гидроксильный
Приморье (Забытое)	34	$1.13-1.25$	Преимущественно фтористый
	80	1.42 ± 0.49	

В препарате полихромного топаза № 80 с первично голубоватыми секторами призм $f\{011\}$, $d\{101\}$ и розоватыми – $m\{110\}$ после облучения реакторными нейтронами проявилась зонально-секториальная неоднородность. Последовательные радиографии через 20 минут после облучения (№ 80а) и через 1.5 месяца (№ 80б) отличаются на фото контрастностью зон (рис. 16, фото 80а, 80б). На ранней фотографии более излучали внутренние светлые зоны призмы $m\{110\}$ топаза с чередованием менее активных тонких зон; по результатам ЛМС анализа, состав группы зон роста призмы $m\{110\}$ отвечает формуле $(Al_{1.95}Ti_{0.03}Fe_{0.02})_2[SiO_4]F_{1.31}(OH)_{0.69}$. Секторы призм $f\{011\}$ и $d\{101\}$ топаза образованы 19-ю чередующимися тонкими зонами, из которых 12 зон средней активности, а 7 периферических зон менее активны. Из-за небольшой величины препарата и тонких зон, состав топаза № 80а определен с помощью ЛМС. Состав зон призм $f\{011\}$ и $d\{101\}$ топаза средней активности (светло-серых на рис. 16, препарат 80а) характеризуется эмпирической формулой $(Al_{1.94}Fe_{0.03}Ti_{0.02})_{1.99}[SiO_4]F_{1.18}(OH)_{0.82}$, а топаз мало-активных зон – формулой $(Al_{1.93}Fe_{0.02}Ti_{0.01})_{1.96}[SiO_4]F_{0.90}(OH)_{0.98}$. Результаты ЛМС анализов остальных препаратов не сохранились.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ранее отмечалось, что химический состав бесцветных, голубых и розовых топазов мало раз-

личаются (в основном, по содержанию фтора) с предцентрами окраски радиационной природы с комплексами Ti^{3+} : $[Ti_1-O_4F_2]$ – в голубых топазах и зонах, а $[Ti_{II}-O_4(OH, F)_2]$ и $[Ti_{III}-O_4(OH)_2]$ – в розовых топазах (Бершов, 1970; Платонов, 1976). В части валентных анионов исследованные топазы подразделились на три типа по частоте встречаемости (табл. 2): 1) преимущественно фтористые (58 %); 2) фтористо-гидроксильные (21 %); 3) преимущественно гидроксильные (21 %).

Распределение исследованных топазов по регионам оказалось неоднородным. Так, месторождения Волыни характеризуются контрастным сочетанием преимущественно фтористых и преимущественно гидроксильных топазов, а в Ильменских горах доминируют фтористые топазы. В Забайкалье преобладают фтористые и фтористо-гидроксильные топазы, в Приморье – преимущественно фтористые топазы.

В исследованных нами топазах закономерной связи их окраски с составом валентных анионов и содержанием в них F не выявлена. В ряде кристаллов топаза от ранних зон роста к поздним зонам призм $m\{110\}$, $l\{120\}$, дипирамиды $o\{111\}$ немного увеличивается параметр b_0 и снижается содержание фтора. После облучения топазов в течение трех минут потоком тепловых нейтронов плотностью $1.58 \cdot 10^{11} \text{ н/см}^2 \cdot \text{сек.}$ картины последовательных радиографий могут быть обусловлены распадом изотопов элементов с интервалами «охлаждения» (τ):

^{28}Al , ^{51}Ti , ^{27}Mg , ^{20}F ($\tau = 10$ мин.); ^{70}Ga ($\tau = 30$ мин.); ^{75}Ge , ^{31}Si , ^{56}Mn ($\tau = 3$ час.); ^{72}Ga , ^{71}Ge ($\tau = 5$ сут.); ^{59}Fe , ^{55}Fe , ^{45}Ca ($\tau = 1$ год) (Попова, 1995).

Методом нейтронно-активационной радиогрaфии наиболее полно выявляются картины зональной и зонально-секториальной неоднородности состава кристаллов топаза (и других минералов), но анализ этих неоднородностей сложен и требует новых сил и методик.

ЛИТЕРАТУРА

Бершов Л.В. (1970) Изоморфизм титана в природных минералах. *Известия АН СССР, сер. геол.*, 12, 47–54.

Беус А.А., Залашкова Н.Е. (1965) О танталовой минерализации в метасоматически-измененных гранитах (апогранитах). *Геология рудных месторождений*, 6, 23–33.

Быковский Ю.А., Тимошин В.Т., Лаптев И.Д., Попова В.И. (1987) Исследование зональности и секториальности природных кристаллов методом лазерной масс-спектрометрии. *Высокочистые вещества*, 1, 218–223.

Заболотная Н.П., Новикова М.И., Шацкая В.Т. (1962) Вольфрам-молибден-олово-бериллиевые месторождения и условия их образования. *Геология месторождений редких элементов*, 18, 95.

Гвоздев В.И., Коростелев П.Г., Игнатьев А.В., Виноградова Л.Г., Недашковский А.П., Сапин В.И. (1990) Минеральные ассоциации и генезис руд месторождения Забытого (Приморье) / *Минеральные ассоциации месторождений олова и вольфрама на Дальнем Востоке*. Владивосток, ДВО АН СССР, 3–16.

Загорский В.Е., Перетяжко И.С., Шмакин Б.М. (1999) Гранитные пегматиты. Том 3. Миароловые пегматиты. Новосибирск, Наука, 488 с.

Кулибин А. (1829) Описание кряжа Адун-чилон. *Горный журнал*, 4, 5–42.

Леммлейн Г.Г. (1948) Секториальное строение кристалла. М.–Л., АН СССР, 1–39.

Леммлейн Г.Г. (1973) Морфология и генезис кристаллов. М., Наука, 325 с.

Леммлейн Г.Г., Меланхолин Н.М. (1951) Об окраске двухцветных кристаллов топаза. *Труды Института кристаллографии*, 6, 245–254.

Макагонов Е.П. (1980) Минералогия гранитного пегматита копи 247 Ильменского заповедника / *Онтогенез пегматитов Урала*. Свердловск, УНЦ АН СССР, 3–10.

Минералы Ильменского заповедника (1949). Под ред. А.Н. Заварицкого. М.–Л., АН СССР, 659 с.

Платонов А.Н. (1976) Природа окраски минералов. Киев, Наукова думка, 264 с.

Платонов А.Н., Таран М.Н., Балицкий В.С. (1984) Природа окраски самоцветов. М., Недра, 195 с.

Попов В.А., Попова В.И. (2006) Минералогия пегматитов Ильменских гор. *Минералогический альманах*, 9, 151 с.

Попов В.А., Попова В.И., Виноградова Л.Г. (1992) Минералогия редкометального месторождения Забытое (Приморье). Миасс, Институт минералогии УрО РАН, 66 с.

Попова В.И. (1995) Нейтронно-активационная радиогрaфия минералов. Миасс, ИМин УрО РАН, 188 с.

Попова В.И., Долгопят Л.Г. (1989) О возможности оценки содержания фтора по величине параметра ячейки b_0 . / *Минералы и минеральное сырье горно-промышленных районов Урала*. Свердловск, УрО АН СССР, 47–52.

Попова В.И., Попов В.А. (1982) Новые данные по геологии и минералогии редкометальных гранитов Западного массива. Миасс, ИГЗ УНЦ АН СССР, 64 с.

Сорокин Ю.Г., Перегуда А.И., Береговенко А.И. (1967). Об уникальной находке топазов на Волини. *Минералогический сборник*, 21(3), 312–313.

Типоморфизм минералов (1989). М., Недра, 559 с.

Ферсман А.Е. (1962) Месторождения топаза в России. Избранные труды, VII, 78–89.

Чупахин М.С., Крючкова О.И., Рамендик Г.И. (1972) Аналитические возможности искровой масс-спектрометрии. М., Атомиздат, 222 с.

REFERENCES

Bershov L.V. (1970) Ti^{3+} isomorphism in natural minerals. *Izvestia AN SSSR, ser. geol. (Izvestiya of the Academy of Sciences USSR, Geological Series)*, 12, 47–54. (in Russian)

Beus A.A., Zalashkova N.E. (1965) Ta mineralization in metasomatically altered granites. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy (Geology of Ore Deposits)*, 6, 23–33. (in Russian)

Bykovsky Yu.A., Timoshin V.T., Laptev I.D., Popova V.I. (1987) Study of zonation and sectoriality of natural crystals by laser mass spectrometry. *Vysokochistye veshchestva (High-Purity Materials)* 1, 218–223. (in Russian)

Chupakhin M.S., Kryuchkova O.I., Ramendik G.I. (1972) Analytical capabilities of spark mass spectrometry. Moscow, Atomizdat, 222 p. (in Russian)

Fersman A.E. (1962) Topaz deposits of Russia. Selected Works, VII, 78–89. (in Russian)

Gvozdev V.I., Korostelev P.G., Ignatiev A.V., Vinogradova L.G., Nedashkovsky A.P., Sapin V.I. (1990) Mineral assemblages and genesis of ores of the Zabytoe deposit (Primorye region). In: *Mineral'nye assotsiatsii mestorozhdenii olova i vol'frama na Dal'nem vostoke (Mineral Assemblages of Tin and Tungsten Deposits in the Far East)*. Vladivostok, DVO AN SSSR, 3–16. (in Russian)

Kulibin A. (1829) Description of the Adun-chilon Ridge. *Gorny zhurnal (Mining Journal)*, 4, 5–42. (in Russian)

- Lemmlein G.G. (1948) Sectorial crystal structure. Moscow–Leningrad, AN SSSR, 1–39. (in Russian)
- Lemmlein G.G. (1973) *Morphology and genesis of crystals*. Moscow, Nauka, 325 p. (in Russian)
- Lemmlein G.G., Melankholin N.M. (1951) About color of two-colored topaz crystals. *Trudy Instituta kristallografii (Proceedings of the Institute of Crystallography)*, 6, 245–254. (in Russian)
- Makagonov E.P. (1980) Mineralogy of granite pegmatite of mine 247 of the Ilmeny Reserve. In: *Ontogeniya pegmatitov Urala (Ontogeny of the Urals Pegmatites)*. Sverdlovsk, UNTs AN SSSR, 3–10. (in Russian)
- Minerals of the Ilmeny Reserve* (1949). Ed. by A.N. Zavaritsky. Moscow–Leningrad, AN SSSR, 659 p. (in Russian)
- Platonov A.N. (1976) *Nature of mineral color*. Kiev, Naukova dumka, 264 p. (in Russian)
- Platonov A.N., Taran M.N., Balitsky V.S. (1984) *Nature of gem color*. M., Nedra, 195 p. (in Russian)
- Popov V.A., Popova V.I. (2006) Mineralogy of pegmatites of the Ilmeny Mountains. *Mineralogicheskyy almanakh (Mineralogical Almanac)*, 9, 151. (in Russian)
- Popov V.A., Popova V.I., Vinogradova L.G. (1992) *Mineralogy of the Zabytoe rare metal deposit (Primorye region)*. Miass, Institut of Mineralogii UrO RAN, 66 p. (in Russian)
- Popova V.I. (1995) Neutron-activation radiography of the minerals. Miass, Institute of Mineralogy, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, 188 p.
- Popova V.I., Dolgopyat L.G. (1989) About the possibility of estimation of F content from cell parameter b_0 . In: *Mineraly i mineral'noe syr'e gorno-promyshlennyykh rayonov Urala (Minerals and Mineral Raw Materials of the Urals Mining and Industrial Regions)*. Sverdlovsk, UrO RAN, 47–52. (in Russian)
- Popova V.I., Popov V.A. (1982) *New data on geology and mineralogy of rare-metal granites of the Zapadny pluton*. Miass, IGZ UNTs AN SSSR, 64 p. (in Russian)
- Sorokin Yu.G., Pereguda A.I., Beregovenko A.I. (1967). About a unique discovery of topaz in Volyn. *Mineralogicheskii sbornik (Mineralogical Collection)*, 21(3), 312–313. (in Russian)
- Typomorphism of minerals* (1989). Moscow, Nedra, 559 p. (in Russian)
- Zabolotnaya N.P., Novikova M.I., Shatskaya V.T. (1962) Tungsten-molybdenum-tin-beryllium deposits and their formation conditions. *Geologiya mestorozhdenii redkikh elementov (Geology of Rare Element Deposits)*, 18, 95 p. (in Russian)
- Zagorsky V.E., Peretyazhko I.S., Shmakina B.M. (1999) Granite pegmatites. Volume 3. Miarolitic pegmatites. Novosibirsk, Science, 488 p.

Информация об авторах

В.И. Попова – кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник Ильменского государственного заповедника, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., Россия, porov@mineralogy.ru

В.А. Попов – доктор геолого-минералогических наук, научный сотрудник Ильменского государственного заповедника, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., Россия, porov@mineralogy.ru

М.А. Рассомахин – младший научный сотрудник Ильменского государственного заповедника, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., Россия, miha_rassomahin@mail.ru

Information about the authors

V.I. Popova – Candidate of Geological-Mineralogical Sciences, Scientific Researcher of the Ilmeny State Reserve, South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Chelyabinsk district, Russia, porov@mineralogy.ru

V.A. Popov – Doctor of Geological-Mineralogical Sciences, Scientific Researcher of the Ilmeny State Reserve, South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Chelyabinsk district, Russia, porov@mineralogy.ru

M.A. Rassomakhin – Junior Researcher of the Ilmeny State Reserve, South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Chelyabinsk district, Russia, miha_rassomahin@mail.ru