

УДК 549.6 + 549.517.14

**МИНЕРАЛОГИЯ ВКЛЮЧЕНИЙ В КОРУНДЕ ИЗ КОПИ № 418  
(ИЛЬМЕНСКИЙ ЗАПОВЕДНИК, ЮЖНЫЙ УРАЛ)**

**М.А. Рассомахин<sup>1</sup>, В.А. Котляров<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Ильменский государственный заповедник, г. Миасс, Челябинская обл., 456317 Россия;  
Miha\_Rassomahin@mail.ru*

<sup>2</sup>*Институт минералогии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., 456317 Россия*

**MINERALOGY OF INCLUSIONS IN CORUNDUM FROM THE MINE NO. 418,  
ILMEN STATE RESERVE, SOUTH URALS**

**M.A. Rassomakhin<sup>1</sup>, V.A. Kotlyarov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Ilmen State Reserve, Miass, Chelyabinsk district, 456317 Russia; Miha\_Rassomahin@mail.ru*

<sup>2</sup>*Institute of Mineralogy UB RAS, Miass, Chelyabinsk district 456317 Russia*

Изучены кристаллы корунда с каймами шпинели и широким спектром минералов-включений из актинолит-слюдяной жилы в изменённых гипербазитах, расположенных среди метатерригенных пород Ильмено-Вишневогорского полиметаморфического комплекса. Совместно с корундом определены 32 минерала, из них впервые в Ильменских горах определены амезит  $Mg_2Al(AlSiO_5)(OH)_4$ , бадделеит  $ZrO_2$ , герсдорфит  $NiAsS$ , диссакисит-(Ce)  $(CaCe)(Al_2Mg)(Si_2O_7)(SiO_4)O(OH)$  и никелин  $NiAs$ . Формирование разнообразных минералов-включений в корунде связано с влиянием высокоглинозёмистого флюида, обогащённого щелочными и редкоземельными элементами, редкими металлами, барием и др., на ультраосновные породы при тектоно-метаморфической активизации комплекса.

Илл. 6. Табл. 8. Библ. 7.

*Ключевые слова:* корунд, сапфир, шпинель, включения, диссакисит-(Ce), бадделеит, Ильменские горы.

Corundum crystals with rims of spinel and a wide spectrum of inclusions are studied from actinolite-mica veins in altered ultramafic rocks located among metaterrigenous rocks of the Ilmeny-Vishnevogorsk polymetamorphic complex. In total, 32 minerals are identified including amesite  $Mg_2Al(AlSiO_5)(OH)_4$ , baddeleyite  $ZrO_2$ , gersdorffite  $NiAsS$ , dissakisite-(Ce)  $(CaCe)(Al_2Mg)(Si_2O_7)(SiO_4)O(OH)$ , and nickeline  $NiAs$ , which were found for the first time in the Ilmeny Mountains. The formation of various inclusions in corundum is related to the influence of high-Al fluid enriched in alkali elements, REEs, rare metals, and Ba during tectono-metamorphic activation of the complex.

Figures 6. Tables 8. References 7.

*Key words:* corundum, sapphire, spinel, inclusions, dissakisite-(Ce), baddeleyite, Ilmeny Mountains.

**Введение**

Корунд в Ильменогорском щелочном комплексе является распространённым минералом. Чаще всего он встречается в щелочных ассоциациях – сиенитовых и миаскитовых пегматитах, сиенитах. Он также обнаружен в высокоглинозёмистых кри-

сталлических сланцах, гранитных пегматитах, «цеолитовом» пегматите копи 295; розовый корунд найден в гипербазитах копи № 97 и Гранатовой горки; в скважине, заложенной в южной части Ильменского заповедника, на глубине 300 м описана жила слюдяной породы с корундом (Поляков и др., 1991).

В 2003 г. при документации дренажной канавы между озёрами Б. Миассово и Б. Таткуль на территории Ильменского заповедника С.Н. Никандровым был найден развал слюдяной породы с кристаллами корунда необычной пятнистой окраски. В 2016 г. участок был расчищен на 12 метров по простиранию и до 6 метров вкrest простирания. Вскрытие жилы показало её значительное отличие по строению от ранее известных объектов, а необычная форма корунда и его ассоциация подвигли к подробному изучению минералогии жилы. Данной копи был присвоен номер 418.

Район копи сложен метатерригенными породами: гранат-полевошпат-биотитовыми, кварц-слюдяными и гранат-полевошпат-амфиболовыми сланцами, графитистыми, гранат-двуслюдяными, слюдяными и гранатовыми кварцитами, включающими в себя блоки пород мафит-ультрамафитовой ассоциации (будинообразные и линзовидные тела серпентинитов, оливин-энстатитовых, энстатитовых, тальк-антофиллитовых, тальк-карбонатных, тремолит-антофиллитовых пород и разнообразных амфиболитов). В одном из таких блоков и залегает исследованное жильное тело.

### Методы исследования

Первичный просмотр и изучение взаимоотношений минералов в необработанных образцах производилось с помощью бинокулярного микроскопа МБС-2. Полированные образцы, аншлифы и шлифы изучались на микроскопе Olimpus VX51. Аналитические исследования производились в Южно-Уральском центре коллективного пользования при Институте минералогии УрО РАН (г. Миасс). Химический состав минералов и съёмка изображений в отражённых электронах произведены на растровом электронном микроскопе РЭММА-202М с энергодисперсионным спектрометром LZ-5 (SiLi детектор, разрешение 140 eV). Ускоряющие напряжения 20 или 30 кВ при токах зонда 4–6 нА, диаметр пучка 1–2 мкм, аналитик В.А. Котляров.

### Геологическое строение

Жила копи 418 представляет собой плитообразное симметрично-зональное тело мощностью 1.0–1.3 метра со следами значительной деформации, залегающее в блоке измененного гипербазита. Элементы залегания: азимут падения (магн.) 330°; угол падения 40°. Блок ультрамафитов размером

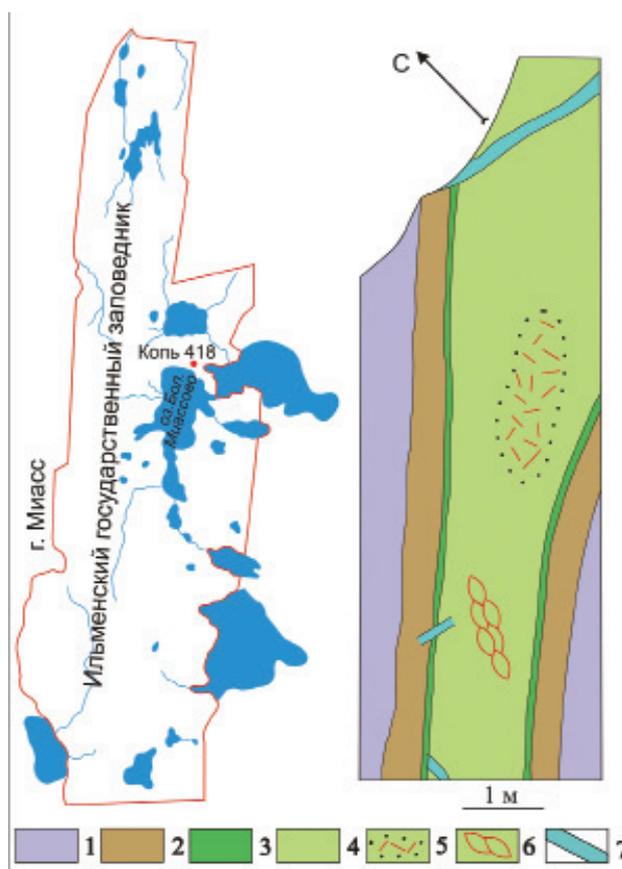


Рис. 1. Схема геологического строения копи № 418.

1 – гипербазит энстатитовый; 2 – гипербазит лимонитизированный; 3 – оталькованный гипербазит, переходящий в плотную актинолитовую породу; 4 – актинолит-слюдяная порода; 5 – слюдяное обособление с корундом; 6 – будины; 7 – жилы антофиллит-асбеста.

Fig. 1. Schematic geological structure of mine no. 418.

1 – enstatite ultramafic rock; 2 – ferriferous ultramafic rock; 3 – talc-bearing ultramafic rock transited to dense actinolite rock; 4 – actinolite-mica rock; 5 – aggregate of mica with corundum; 6 – boudines; 7 – veins of anthophyllite-asbestos.

первые десятки метров, вмещающий жилу, сложен мономинеральным крупнозернистым (до 4–5 см) агрегатом энстатита с незначительным количеством оливина и клинопироксена и наложенными тальком и хризотил-асбестом. Также здесь присутствуют секущие жилы антофиллит-асбеста с тальком и карбонатом.

В строении тела выделяются следующие зоны (рис. 1):

- вмещающий гипербазит;
- лимонитизированный и карбонатизированный гипербазит;
- зона оталькования гипербазита, сменяющаяся в сторону центра плотной актинолитовой породой.

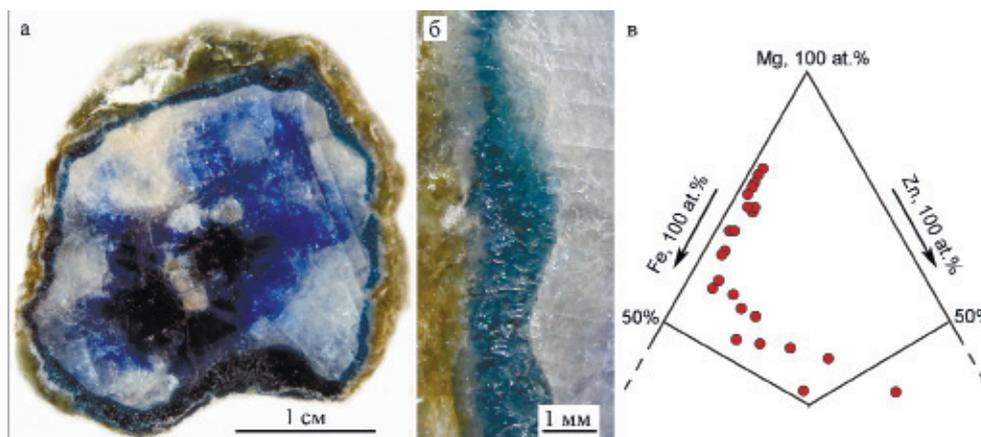


Рис. 2. Структура зональных шпинель-корундовых агрегатов.

а – пятнисто-зональное зерно корунда в оторочке шпинели и вермикулита; б – параллельно-шестоватый агрегат шпинели на границе корунда и вермикулита; в – состав шпинели; а, б – отсканированный полированный срез.

Fig. 2. Structure of zonal spinel-corundum aggregates.

а – spotted-zonal corundum grain rimmed by spinel and vermiculite; б – parallel-columnar aggregate of spinel at the boundary of corundum and vermiculite; в – composition of spinel. а, б – scanned polished section.

В шлифах фиксируется постепенный переход от мономинерального агрегата талька к амфиболовому агрегату. В амфиболовой части, помимо преобладающего моноклинного (актинолит-тремолит), присутствует и ромбический амфибол – антофиллит;

– центральная зона состоит из будин различного состава (сланцевых, актинолитовых, актинолит-сланцевых, сланцевых с корундом, шпинелевых и др.) со сланцевым и актинолитовым матриксом.

### Минералы-включения в корунде

Изучены индивиды корунда из актинолит-сланцевых и полевошпат-шпинелевых будин. Основным объектом исследований был корунд и минералы его парагенетической ассоциации из зон от центра к краю: корунд с минералами-включениями → кайма шпинели → кайма хлорита. Между индивидами большинства минералов-включений присутствуют индукционные поверхности одновременного роста с корундом, шпинелью и хлоритом, а также другими минералами-включениями. По трещинам развиты поздние барьерные полевые шпаты (гиалофан, цельзиан) и диаспор.

**Корунд** образует монокристаллы пятнисто-зональной окраски с зонами бесцветного полупрозрачного лейкосапфира и зонами насыщенного голубого прозрачного сапфира (рис. 2а). Кристаллы обладают чаще всего сложной, глубоко изрезанной формой и содержат многочисленные вросстки слюды и хлорита. Реже встречаются короткостолбча-

тые и бочонкообразные кристаллы, но с гранями, покрытыми обильными вростками слюды и шпинели. Размер кристаллов до 4 см. В актинолит-сланцевых будинах индивиды корунда окаймлены шпинелью сине-зелёного цвета.

**Шпинель** образует параллельно-шестоватые агрегаты вокруг кристаллов корунда (рис. 2б), а также включения в нём и отдельные ксеноморфные зёрна в породе. Состав шпинели изменчив: содержание ZnO варьирует от долей процента до 22 мас. % (ганит) (см. рис. 2в, табл. 1, ан. 1–3), FeO – от 7 до 17 мас. %. В отдельных зональных зёрнах содержание ZnO варьирует от 2.46 до 7.47 мас. % (см. табл. 1, ан. 1, 2). Можно выделить два тренда составов шпинели – Mg–Fe (с незначительной примесью Zn) и {Mg,Fe}–Zn (с практически неизменным соотношением железа и магния и переменным содержанием цинка).

**Клинохлор** и **амезит** визуально неразличимы, образуют зеленовато-серые включения и вросстки размером до 5 мм в корунде, шпинели и по их границам. Также образуют каймы вокруг уранинит-броккитовых и монацитовых зёрен в корунде. Отличаются по химическому составу (см. табл. 1, ан. 4–8).

**Мусковит** встречается повсеместно в виде небольших (до 0.2 мм) включений в корунде, хлорите и других минералах. Для мусковита характерно повышенное содержание MgO от 0.5 до 2.5 мас. % и содержания FeO менее 0.5 мас. % (см. табл. 1, ан. 9, 10).

Таблица 1

## Химический состав (мас. %) шпинели и силикатов из включений в корунде копи № 418

Table 1

## Chemical composition (wt. %) of spinel and silicates from inclusions in corundum of mine no. 418

№ ан.	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	ZnO	NiO	MnO	H <sub>2</sub> O <sub>расч</sub>	Сумма
1	–	–	–	–	66.11	16.32	14.52	2.46	0.12	0.24	–	99.77
2	–	–	–	–	65.24	14.44	12.22	7.47	–	0.17	–	99.54
3	–	–	–	–	62.01	7.11	8.26	22.21	0.23	–	–	99.82
4	–	–	–	27.70	23.25	3.19	32.24	–	0.16	–	12.62	99.16
5	–	–	–	26.96	24.21	4.32	31.51	–	0.20	0.11	12.65	99.96
6	–	–	–	26.57	24.92	9.47	26.24	–	0.12	0.20	12.38	99.90
7	–	–	–	19.32	37.94	3.78	26.09	–	0.26	0.19	12.67	100.25
8	–	–	–	26.78	24.02	9.44	27.57	–	–	–	12.41	100.22
9	0.34	10.50	–	47.24	37.29	0.29	0.54	–	–	–	4.59	100.79
10	0.24	8.13	0.45	46.52	37.42	0.39	2.45	–	–	–	4.61	100.21
11	2.74	–	0.44	37.93	37.67	1.60	10.00	–	–	–	–	90.38

Расчётные формулы на O = 4 (ан. 1–6), на сумму зарядов = 28 (ан. 4–6), 14 (ан. 7, 8), 22 (ан. 9, 10)

1	Mg <sub>0.56</sub> Fe <sub>0.35</sub> Zn <sub>0.05</sub> Mn <sub>0.005</sub> Ni <sub>0.003</sub> Al <sub>2.01</sub> O <sub>4</sub>
2	Mg <sub>0.48</sub> Fe <sub>0.32</sub> Zn <sub>0.14</sub> Mn <sub>0.004</sub> Al <sub>2.03</sub> O <sub>4</sub>
3	Zn <sub>0.45</sub> Mg <sub>0.34</sub> Fe <sub>0.16</sub> Ni <sub>0.005</sub> Al <sub>2.02</sub> O <sub>4</sub>
4	Mg <sub>4.56</sub> Fe <sub>0.25</sub> Ni <sub>0.01</sub> Al(Si <sub>2.63</sub> Al <sub>1.60</sub> O <sub>10</sub> )(OH) <sub>8</sub>
5	Mg <sub>4.46</sub> Fe <sub>0.34</sub> Ni <sub>0.01</sub> Mn <sub>0.01</sub> Al(Si <sub>2.56</sub> Al <sub>1.71</sub> O <sub>10</sub> )(OH) <sub>8</sub>
6	Mg <sub>3.79</sub> Fe <sub>0.77</sub> Mn <sub>0.02</sub> Ni <sub>0.01</sub> Al(Si <sub>2.57</sub> Al <sub>1.85</sub> O <sub>10</sub> )(OH) <sub>8</sub>
7	Mg <sub>1.84</sub> Fe <sub>0.15</sub> Ni <sub>0.01</sub> Mn <sub>0.01</sub> Al <sub>1.00</sub> (Al <sub>1.11</sub> Si <sub>0.91</sub> O <sub>5</sub> )(OH) <sub>4</sub>
8	Mg <sub>1.98</sub> Fe <sub>0.38</sub> Al <sub>1.00</sub> (Si <sub>1.29</sub> Al <sub>0.37</sub> O <sub>5</sub> )(OH) <sub>4</sub>
9	K <sub>0.87</sub> Mg <sub>0.05</sub> Na <sub>0.04</sub> Fe <sub>0.02</sub> Si <sub>3.08</sub> Al <sub>2.87</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>
10	K <sub>0.67</sub> Mg <sub>0.24</sub> Na <sub>0.03</sub> Ca <sub>0.03</sub> Fe <sub>0.02</sub> Si <sub>3.03</sub> Al <sub>2.87</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>

Примечание. 1, 2 – шпинель, центральная и внешняя зоны кристалла соответственно; 3 – ганит; 4–6 – клинохлор; 7, 8 – амезит; 9, 10 – мусковит; 11 – дравит. Формула турмалина не рассчитана из-за неполного анализа.

Note. 1, 2 – spinel, central and outer zones of crystal, respectively; 3 – gahnite; 4–6 – clinocllore; 7, 8 – amesite; 9, 10 – muscovite; 11 – dravite. Formula of tourmaline is not provided because of incomplete chemical analysis.

Таблица 2

## Химический состав (мас. %) оксидов – включений в корунде из копи № 418

Table 2

## Chemical composition (wt. %) of oxide inclusions in corundum of mine no. 418

№ ан.	Na <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	FeO	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	UO <sub>2</sub>	Сумма
1	0.66	13.59	5.87	–	0.38	14.00	46.07	–	–	–	16.44	97.01
2	1.50	14.20	1.30	0.44	1.29	1.65	73.79	0.80	1.96	0.20	–	97.14
3	–	7.36	9.39	0.14	1.01	27.83	36.02	2.16	6.39	1.15	1.78	99.18
4	–	–	61.88	–	4.83	1.46	31.79	–	–	–	–	99.97

Расчётные формулы на O = 7 (ан. 1, 2), O = 6 (ан. 3) и O = 2 (ан. 4)

1	(Ca <sub>1.29</sub> U <sub>0.32</sub> Na <sub>0.11</sub> Fe <sub>0.03</sub> ) <sub>1.75</sub> (Ta <sub>1.11</sub> Nb <sub>0.56</sub> Ti <sub>0.39</sub> ) <sub>2.06</sub> O <sub>6</sub> (O,OH)
2	(Ca <sub>1.44</sub> Na <sub>0.28</sub> Fe <sub>0.10</sub> Ce <sub>0.07</sub> Mn <sub>0.04</sub> La <sub>0.04</sub> Pr <sub>0.01</sub> ) <sub>1.98</sub> (Ta <sub>1.9</sub> Nb <sub>0.07</sub> Ti <sub>0.09</sub> ) <sub>2.06</sub> O <sub>6</sub> (O,OH)
3	(Ca <sub>0.53</sub> Ce <sub>0.16</sub> Nd <sub>0.08</sub> La <sub>0.08</sub> Gd <sub>0.03</sub> Pr <sub>0.03</sub> U <sub>0.03</sub> Fe <sub>0.06</sub> Sm <sub>0.02</sub> Mn <sub>0.01</sub> ) <sub>1.03</sub> (Nb <sub>0.85</sub> Ta <sub>0.66</sub> Ti <sub>0.48</sub> ) <sub>1.99</sub> (O,OH) <sub>6</sub>
4	Ti <sub>0.77</sub> Ta <sub>0.14</sub> Fe <sub>0.07</sub> Nb <sub>0.01</sub> O <sub>2</sub>

Примечание. 1, 2 – микролит; 3 – ферсмит (?), в сумме содержит также (мас. %) 3.50 Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0.89 Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 1.57 Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 4 – рутил.

Note. 1, 2 – microlite; 3 – fersmite (?) also contains (wt. %) 3.50 Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0.89 Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 1.57 Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 4 – rutile.

**Дравит** коричневатого цвета образует кристаллы до 3 см, формируя сростки с корундом в актинолит-сланцевой будине, а также зёрна в полевошпат-шпинелевой будине. Состав дравита маложелезистый (FeO до 1.6 мас. %) с низким содержанием CaO (менее 0.5 мас. %) (см. табл. 1, ан. 11).

**Микролит** (по Hogarth, 1977) образует мелкие (до 0.1 мм) зёрна неправильной формы и кри-

сталлы кубооктаэдрического габитуса в хлорите. Для него характерны высокие содержания UO<sub>2</sub> (>15 мас. %) и Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (14 мас. %) (табл. 2, ан. 1, 2).

**Ферсмит** (или **виджецит**, структура не определена) образует идиоморфные удлинённо-призматические кристаллы размером до 70 мкм в хлорите. В отличие от микролита содержания Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>

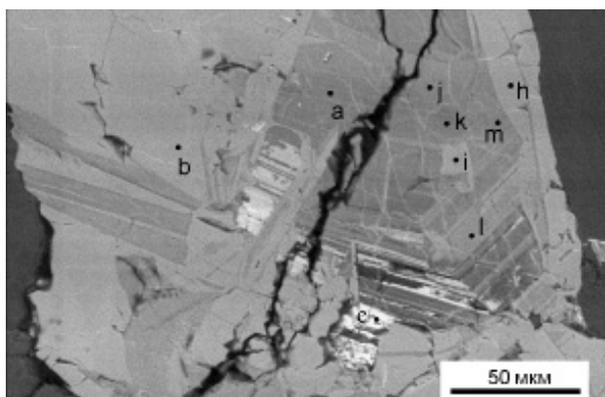


Рис. 3. Зонально-секториальный кристалл изменённого алланита (?) с диссакиситом-(Ce) (b, h, i) и монацитом-(Ce) (c). BSE-фото.

Fig. 3. Zonal-sectorial crystal of altered allanite (?) with dissakisite-(Ce) (b, h, i) and monazite-(Ce) (c). BSE-photo.

близки (28 и 36 мас. %, соответственно) (см. табл. 2, ан. 3).

**Диаспор** заполняет трещинки в корунде, образует включения в хлоритовых каймах вокруг уранинита и пластинчатые агрегаты в поздних трещинах совместно с бариевыми полевыми шпатами.

**Рутил** представлен единичными зёрнами до 50 мкм в шпинели, по составу соответствует стрювериту (Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 31.79 мас. %) (см. табл. 2, ан. 4).

**Диссакисит-(Ce)** образует внешние зоны и пятна в центральной области зонально-секториального кристалла (рис. 3, точки b, h, i), сложенного, вероятно, изменённым минералом группы алланита (Sorokina et al., *inpress*). Для центральной части кристалла характерно превышение; Fe над Mg (к.а.ф характерно для алланита) (табл. 3) (см. рис. 3, точки a, j, k, l, m), но анализы этих зон не рассчитываются на стехиометрическую формулу группы алланита. Расчётные формулы характеризуются значительным недостатком в позициях А и В кристаллохимической формулы элементов (Ca, TRR) и (Al, Fe, Mg) по отношению к позиции кремнезёма. Причиной такого несоответствия могут быть метасоматические изменения отдельных зон с образованием тонкой смеси силикатов редких земель и других минералов.

**Ортоклаз барийсодержащий** (гиалофан) и **цельзиан** образуют пластинчатые кристаллы размером до 10 мкм в полостях поздних трещинок, где образуют скопления размером до 60 мкм совместно с диаспором (рис. 4). Содержания BaO варьируют от 6 мас. % в гиалофане (табл. 4, ан. 1, 2) до 33 мас. % в цельзиане (см. табл. 4, ан. 3, 4).

**Анортит** обнаружен в «шпинелевой будине», где он образует кристаллы до 3 мм в сростании с амфиболами и хлоритом. Характеризуется незначительной примесью Na и Fe (см. табл. 4, ан. 5).

Таблица 3

Химический состав (мас. %) диссакисита-(Ce) и продуктов изменения минерала группы алланита (?) из копи № 418

Table 3

Chemical composition (wt. %) of dissakisite-(Ce) and alteration products of mineral of the allanite group (?) from mine no. 418

№ ан.	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	FeO	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ThO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O <sub>расч</sub>	Сумма
1a	2.55	18.80	45.78	9.89	—	5.40	2.99	8.68	0.91	1.80	1.19	2.30	100.29
2b	3.51	22.57	35.86	12.59	—	3.76	4.27	10.78	1.35	2.82	—	1.80	99.31
3h	2.93	22.66	34.37	12.69	0.09	4.66	4.35	11.51	2.17	3.00	0.52	1.70	100.65
4i	3.16	22.49	34.58	12.38	—	4.36	4.40	11.74	1.72	2.75	—	1.72	99.30
5j	2.90	17.83	37.74	9.69	0.13	5.02	3.32	9.35	1.48	2.51	1.25	1.90	93.12
6k	2.44	17.44	41.01	9.49	0.27	5.43	2.69	8.14	1.19	1.69	1.75	2.05	93.59
7l	2.86	20.97	38.33	11.31	0.06	4.97	3.44	9.54	1.16	1.71	0.77	1.90	97.02
8m	2.70	18.57	39.11	10.29	0.08	4.97	3.09	9.09	1.11	2.14	1.39	1.95	94.49
Расчётные формулы на Si = 3													
1a	Ca <sub>0.69</sub> Ce <sub>0.21</sub> La <sub>0.07</sub> Nd <sub>0.04</sub> Pr <sub>0.02</sub> Th <sub>0.02</sub> (Al <sub>1.45</sub> Fe <sub>0.30</sub> Mg <sub>0.25</sub> )[Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> ][SiO <sub>4</sub> ]O(OH)												
2b	Ca <sub>1.13</sub> Ce <sub>0.33</sub> La <sub>0.13</sub> Nd <sub>0.08</sub> Pr <sub>0.04</sub> Th <sub>0.223</sub> (Al <sub>2.23</sub> Mg <sub>0.44</sub> Fe <sub>0.26</sub> )[Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> ][SiO <sub>4</sub> ]O(OH)												
3h	Ca <sub>1.19</sub> Ce <sub>0.37</sub> La <sub>0.14</sub> Nd <sub>0.09</sub> Pr <sub>0.07</sub> Th <sub>0.01</sub> (Al <sub>2.33</sub> Mg <sub>0.38</sub> Fe <sub>0.34</sub> )[Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> ][SiO <sub>4</sub> ]O(OH)												
4i	Ca <sub>1.15</sub> Ce <sub>0.37</sub> La <sub>0.14</sub> Nd <sub>0.09</sub> Pr <sub>0.05</sub> Th <sub>0.230</sub> (Al <sub>2.30</sub> Mg <sub>0.41</sub> Fe <sub>0.32</sub> )[Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> ][SiO <sub>4</sub> ]O(OH)												
5j	Ca <sub>0.83</sub> Ce <sub>0.27</sub> La <sub>0.10</sub> Nd <sub>0.07</sub> Pr <sub>0.04</sub> Th <sub>0.02</sub> (Al <sub>1.67</sub> Mg <sub>0.34</sub> Fe <sub>0.33</sub> )[Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> ][SiO <sub>4</sub> ]O(OH)												
6k	Ca <sub>0.74</sub> Ce <sub>0.22</sub> La <sub>0.07</sub> Nd <sub>0.04</sub> Pr <sub>0.03</sub> Th <sub>0.03</sub> (Al <sub>1.50</sub> Fe <sub>0.33</sub> Mg <sub>0.27</sub> )[Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> ][SiO <sub>4</sub> ]O(OH)												
7l	Ca <sub>0.95</sub> Ce <sub>0.27</sub> La <sub>0.10</sub> Nd <sub>0.05</sub> Pr <sub>0.03</sub> Th <sub>0.01</sub> (Al <sub>1.93</sub> Mg <sub>0.33</sub> Fe <sub>0.32</sub> )[Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> ][SiO <sub>4</sub> ]O(OH)												
8m	Ca <sub>0.85</sub> Ce <sub>0.26</sub> La <sub>0.09</sub> Nd <sub>0.06</sub> Pr <sub>0.03</sub> Th <sub>0.02</sub> (Al <sub>1.68</sub> Fe <sub>0.32</sub> Mg <sub>0.31</sub> )[Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> ][SiO <sub>4</sub> ]O(OH)												

Примечание. 1, 5–8 – продукты изменения алланита (?); 2–4 – диссакисит-(Ce). Буквы – участки анализа (см. рис. 3).

Note. 1, 5–8 – alteration products of allanite (?); 2–4 – dissakisite-(Ce). Letters – the areas of analysis (see Fig. 3).

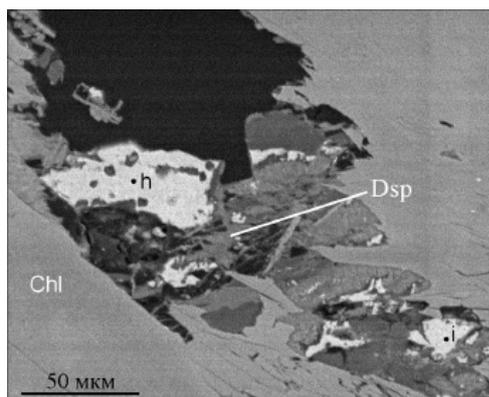


Рис. 4. Барийсодержащий ортоклаз (гиалофан) (точки h, i) с пластинками диаспора (Dsp) в полости в хлорите (Chl). BSE-фото.

Fig. 4. Barium orthoclase (hyalophane) (points h, i) with diaspore (Dsp) plates in cavity of chlorite (Chl). BSE-photo.

Скаполит образует зёрна размером до 20 мкм в хлорите. Состав промежуточный – мейонит-мариалит, но формально соответствует **мариалиту**; содержание Cl составляет ~1.7 мас. %, CaO ~11 мас. %, Na<sub>2</sub>O ~7 мас. %.

**Хизлевудит** находится в ассоциации с корундом, шпинелью, клинохлором и высокожелезистым миллеритом. Размер зерен не превышает 0.3 мм. Химический состав минерала (мас. %): Ni 69.9; S 27.0; Fe 1.22; сумма 98.13; расчётная формула (на S = 2) Ni<sub>1.283</sub>Fe<sub>0.05</sub>S<sub>2</sub> (Никандров и др., 2017).

**Миллерит** образует мелкие изометричные зёрна до первых десятков микрометров в шпине-

ли и хлорите в ассоциации с маухеритом и хизлевудитом. Примесь Fe варьирует в широких пределах – от 1.48 до 21 мас. %, Co – от 0 до 2.77 мас. %, в одном анализе зафиксирована примесь As 2 мас. % (табл. 5, ан. 1–4).

**Галенит** установлен в сростании с железистым миллеритом. Величина индивида 10 мкм, состав соответствует стехиометрической формуле.

**Маухерит** образует пластинчатые кристаллы размером до 15 мкм. Присутствует примесь S 0.61 и Fe до 2.06 мас. % (см. табл. 5, ан. 5, 6). Установлен в сростании с хизлевудитом и миллеритом.

**Никелин** образует кристаллы ромбического сечения до 20 мкм в хлорите и в турмалине, содержит примеси Fe и S около 0.8 мас. % (см. табл. 5, ан. 7, 8).

**Герсдорфит** определён во внутренней зоне пятнистого зерна, состоящего из хизлевудита, герсдорфита, галенита и, вероятно, годлевскита, на контакте хлорита с корундом (см. табл. 5, ан. 9).

**Уранинит** совместно с **броккитом** образуют концентрически-зональные зёрна с каймой хлорит/амезит+диаспор (рис. 5а). Состав уранинита, мас. %: ThO<sub>2</sub> 37.49, PbO 2.01, FeO 0.96, UO<sub>2</sub> 52.46, сумма 92.92; формула U<sub>0.56</sub>Th<sub>0.41</sub>Fe<sub>0.04</sub>Pb<sub>0.03</sub>O<sub>2</sub>. Броккит определён по качественному энергодисперсионному спектру с основными пиками Th, Ca и P (см. рис. 5б).

«Апатит» встречен как в виде включений в корунде, где он образует короткостолбчатые кристаллы до 1 мм, так и включения в хлорите до 1 мм совместно с цирконом. По составу отдельные участ-

Таблица 4

Химический состав (мас. %) полевых шпатов и скаполита – включений в корунде из копи № 418

Table 4

Chemical composition (wt. %) of feldspars and scapolite – inclusions in corundum from mine no. 418

№ ан.	Na <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	FeO	BaO	MgO	Cl	CO <sub>2</sub> расч	Сумма
1h	0.65	21.31	58.48	12.60	0.16	0.01	6.67	–	–	–	99.90
2i	0.57	20.79	58.67	12.64	0.18	0.34	6.18	0.25	–	–	99.60
3	0.69	29.35	34.41	0.34	–	0.58	33.63	0.83	–	–	99.83
4	0.88	29.02	35.18	0.40	–	0.52	32.97	0.47	–	–	99.43
5	0.37	37.32	42.50	–	19.24	0.07	–	–	–	–	99.50
6	6.79	24.30	51.31	0.16	11.09	0.26	–	–	1.76	2.80	98.47
7	7.14	24.76	51.09	0.25	10.82	0.14	–	–	1.72	2.90	98.82
Расчётные формулы на O = 8 (ан. 1–5), на сумму зарядов = 48 (ан. 6, 7).											
1h	K <sub>0.77</sub> Ba <sub>0.13</sub> Na <sub>0.06</sub> Ca <sub>0.01</sub> Al <sub>1.21</sub> Si <sub>2.82</sub> O <sub>8</sub>										
2i	K <sub>0.78</sub> Ba <sub>0.12</sub> Na <sub>0.05</sub> Mg <sub>0.02</sub> Al <sub>1.18</sub> Fe <sub>0.01</sub> Si <sub>2.83</sub> O <sub>8</sub>										
3	Ba <sub>0.77</sub> Na <sub>0.08</sub> Mg <sub>0.07</sub> Fe <sub>0.03</sub> K <sub>0.03</sub> Al <sub>2.03</sub> Si <sub>2.02</sub> O <sub>8</sub>										
4	Ba <sub>0.76</sub> Na <sub>0.10</sub> Mg <sub>0.04</sub> Fe <sub>0.03</sub> K <sub>0.03</sub> Al <sub>2.00</sub> Si <sub>2.06</sub> O <sub>8</sub>										
5	Ca <sub>0.96</sub> Na <sub>0.03</sub> Fe <sub>0.01</sub> Al <sub>2.05</sub> Si <sub>1.98</sub> O <sub>8</sub>										
6	Na <sub>1.92</sub> Ca <sub>1.73</sub> K <sub>0.03</sub> Fe <sub>0.03</sub> Al <sub>4.18</sub> Si <sub>7.49</sub> O <sub>24</sub> (CO <sub>2</sub> ) <sub>2.056</sub> Cl <sub>0.44</sub>										
7	Na <sub>2.02</sub> Ca <sub>1.69</sub> K <sub>0.05</sub> Fe <sub>0.02</sub> Al <sub>4.25</sub> Si <sub>7.44</sub> O <sub>24</sub> (CO <sub>2</sub> ) <sub>0.58</sub> Cl <sub>0.42</sub>										

Примечание. 1, 2 – гиалофан, буквы – участки анализа (см. рис. 4); 3, 4 – цельзиан; 5 – анортит; 6, 7 – мариалит.

Note. 1, 2 – hyalophane, letters – the areas of analysis (see Fig. 4); 3, 4 – celsian; 5 – anorthite; 6, 7 – marialite.

Таблица 5

## Химический состав (мас. %) сульфидов и арсенидов – включений в корунде из копи № 418

Table 5

## Chemical composition (wt. %) of sulfides and arsenides – inclusions in corundum from mine no. 418

№ ан.	S	Fe	Co	Ni	As	Сумма	Формула
1	33.56	11.48	–	52.92	2.05	100.00	$Ni_{0.84}Fe_{0.19}S_{0.97}As_{0.03}$
2	34.62	20.56	2.77	41.92	–	99.87	$Ni_{0.66}Fe_{0.34}Co_{0.04}S_{1.00}$
3	35.14	1.48	1.30	61.25	–	99.17	$Ni_{0.95}Fe_{0.02}Co_{0.02}S_{1.00}$
4	35.52	20.95	0.75	42.49	–	99.71	$Ni_{0.65}Fe_{0.34}Co_{0.01}S_{1.00}$
5	0.61	0.74	–	50.92	47.32	99.59	$Ni_{10.67}Fe_{0.16}As_{7.77}S_{0.23}$
6	0.61	2.06	–	49.84	47.43	99.94	$Ni_{10.42}Fe_{0.45}As_{7.77}S_{0.23}$
7	0.76	0.78	–	43.83	54.18	99.55	$Ni_{1.00}Fe_{0.02}As_{0.97}S_{0.03}$
8	–	0.75	–	43.48	55.15	99.38	$Ni_{1.01}Fe_{0.02}As_{1.00}$
9	19.50	3.15	12.76	21.80	42.37	99.58	$Ni_{0.63}Co_{0.37}Fe_{0.10}As_{0.96}S_{1.04}$

Примечание. 1–4 – миллерит; 5, 6 – маухерит; 7, 8 – никелин; 9 – герсдорфит. Формулы рассчитаны на сумму As + S = 1 (ан. 1–4, 7, 8), 8 (ан. 5, 6) и 2 (ан. 9).

Note. 1–4 – millerite; 5, 6 – maucherite; 7, 8 – nickeline; 9 – gersdorffite. Formulas are recalculated to sum of As + S = 1 (an. 1–4, 7, 8), 8 (an. 5, 6) and 2 (an. 9).

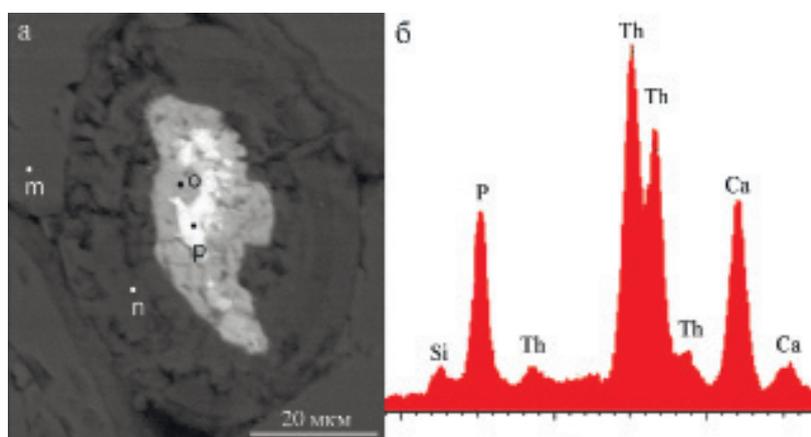


Рис. 5. Агрегат уранинита (точка p), броккита (точка o) и амезита (точка n) в шпинели (точка m) (a) и EDS броккита (б). BSE-фото.

Fig. 5. Fig. 5. Aggregate of uraninite (point p), brockite (point o), and amesite (point n) in spinel (point m) (a) and EDS of brockite (б). BSE-photo.

ки кристаллов соответствуют гидроксилapatиту, фторапатиту и хлорапатиту (табл. 6, ан. 1–3).

**Монацит-(Ce)** в зёрнах размером до 20 мкм установлен в трещинках и краевых частях зёрен диссаксита-алланита (см. рис. 3, точка с). Содержание CaO в монаците составляет 0.38–8.25 мас. %,  $Ce_2O_3$  – 23.11–37.53 мас. %,  $La_2O_3$  – 10–22 мас. %; в некоторых анализах присутствует примесь  $SiO_2$  до 6.74 мас. % и  $ThO_2$  до 4.04 мас. % (табл. 7).

Амфибол образует небольшие зёрна до 150 мкм в хлорите в полевошпат-шпинелевой будине и формально соответствует паргаситу и чермакиту (см. табл. 6, ан. 4–7).

**Циркон** в виде мелких зональных кристаллов (рис. 6) встречен практически во всех исследованных образцах: в корундах и хлоритовой оторочке в ассоциации с апатитом, в полевошпат-шпинелевой породе в ассоциации с пироксеном и апатитом. В составе отмечаются примеси Hf (3–6 мас. %

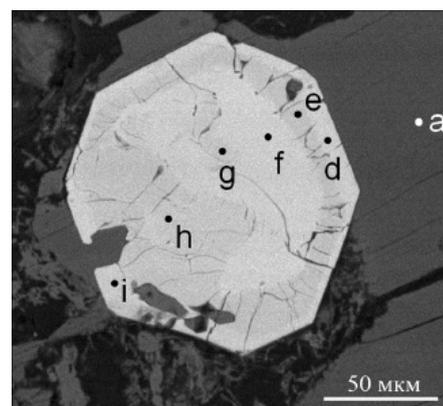


Рис. 6. Зональный кристалл циркона. BSE-фото. Буквы – участки анализа см табл. 8.

Fig. 6. Zonal zircon crystal. BSE-photo. Letters – sections of the analysis, see table. 8.

Таблица 6

## Химический состав (мас. %) апатитов и амфиболов, копь № 418

Table 6

## Chemical composition (wt. %) of apatite and amphibole from mine no. 418

№ ан.	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cl	F	K <sub>2</sub> O	CaO	FeO	Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> O <sub>расч</sub>	Сумма
1	0.13	0.08	–	0.27	43.42	2.43	0.9	–	54.78	0.12	0.16	1.54	104.00
2	–	0.10	–	–	42.78	0.58	3.19	–	54.88	–	0.43	0.27	102.45
3	0.08	–	–	0.19	42.25	2.71	1.00	–	53.66	–	0.18	1.20	101.27
1	2.81	18.48	17.34	44.07	–	–	–	0.23	11.68	3.07	–	2.14	99.82
2	2.55	17.26	19.13	42.72	–	0.21	–	0.25	12.12	3.75	–	2.08	100.07
3	2.17	16.88	19.26	42.82	–	0.18	–	0.22	12.18	4.00	–	2.05	99.76
4	2.25	17.15	18.50	43.53	–	0.21	–	0.29	12.36	3.88	–	2.04	100.21
Расчётные формулы на сумму зарядов = 25 (ан. 1–3), 46 (ан. 4–7)													
1	Ca <sub>4.87</sub> Na <sub>0.02</sub> Mg <sub>0.01</sub> Mn <sub>0.01</sub> Fe <sub>0.01</sub> P <sub>3.05</sub> Si <sub>0.02</sub> O <sub>12</sub> (OH) <sub>0.43</sub> Cl <sub>0.34</sub> F <sub>0.23</sub>												
2	Ca <sub>4.93</sub> Mg <sub>0.01</sub> Sr <sub>0.01</sub> Ce <sub>0.01</sub> P <sub>3.04</sub> O <sub>12</sub> F <sub>0.85</sub> Cl <sub>0.08</sub> (OH) <sub>0.07</sub>												
3	Ca <sub>4.91</sub> Na <sub>0.01</sub> Ce <sub>0.01</sub> P <sub>3.05</sub> Si <sub>0.02</sub> O <sub>12</sub> Cl <sub>0.39</sub> (OH) <sub>0.34</sub> F <sub>0.27</sub>												
4	(Na <sub>0.47</sub> K <sub>0.04</sub> ) <sub>0.51</sub> (Ca <sub>1.72</sub> Na <sub>0.28</sub> ) <sub>2.00</sub> [Mg <sub>3.78</sub> (Fe <sup>3+</sup> <sub>0.35</sub> Al <sub>0.87</sub> ) <sub>1.22</sub> ] <sub>5.00</sub> Si <sub>6.05</sub> Al <sub>1.95</sub> O <sub>22</sub> (OH) <sub>2.00</sub>												
5	(Na <sub>0.47</sub> K <sub>0.04</sub> ) <sub>0.51</sub> (Ca <sub>1.77</sub> Na <sub>0.21</sub> ) <sub>2.00</sub> [Mg <sub>3.55</sub> (Fe <sup>3+</sup> <sub>0.43</sub> Al <sub>1.02</sub> ) <sub>1.45</sub> ] <sub>5.00</sub> Si <sub>5.90</sub> Al <sub>2.10</sub> O <sub>22</sub> (OH) <sub>1.95</sub> Cl <sub>0.05</sub>												
6	(Na <sub>0.38</sub> K <sub>0.04</sub> ) <sub>0.42</sub> (Ca <sub>1.80</sub> Na <sub>0.20</sub> ) <sub>2.00</sub> [Mg <sub>3.48</sub> (Fe <sup>3+</sup> <sub>0.46</sub> Al <sub>1.06</sub> ) <sub>1.52</sub> ] <sub>5.00</sub> Si <sub>5.92</sub> Al <sub>2.08</sub> O <sub>22</sub> (OH) <sub>1.95</sub> Cl <sub>0.05</sub>												
7	(Na <sub>0.43</sub> K <sub>0.05</sub> ) <sub>0.48</sub> (Ca <sub>1.83</sub> Na <sub>0.17</sub> ) <sub>2.00</sub> [Mg <sub>3.53</sub> (Fe <sup>3+</sup> <sub>0.45</sub> Al <sub>1.02</sub> ) <sub>1.47</sub> ] <sub>5.00</sub> Si <sub>6.01</sub> Al <sub>1.99</sub> O <sub>22</sub> (OH) <sub>1.96</sub> Cl <sub>0.04</sub>												

Примечание. 1 – гидроксилapatит, 0.17 мас. % MnO; 2 – фторапатит, 0.22 мас. % SrO; 3 – хлорапатит; 4, 5 – паргасит; 6, 7 – чермакит.

Note. 1 – hydroxylapatite, 0.17 wt. % MnO; 2 – fluorapatite, 0.22 wt. % SrO; 3 – chlorapatite; 4, 5 – pargasite; 6, 7 – tschermakite.

Таблица 7

## Химический состав (мас. %) монацита-(Ce) из копи № 418

Table 7

## Chemical composition (wt. %) of monazite-(Ce) from mine no. 418

№ ан.	SiO <sub>2</sub>	CaO	FeO	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ThO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	UO <sub>2</sub>	Сумма
1	6.74	8.25	–	10.09	29.07	4.49	7.27	4.04	28.75	0.54	0.77	100.01
2	4.00	7.09	1.71	10.05	23.11	2.92	8.77	–	40.38	1.15	–	99.18
3	–	0.38	–	21.92	37.53	3.44	4.25	1.80	29.70	–	–	99.02
Расчётные формулы на O = 4												
1	Ce <sub>0.38</sub> Ca <sub>0.31</sub> La <sub>0.13</sub> Nd <sub>0.09</sub> Pr <sub>0.06</sub> Th <sub>0.03</sub> Sm <sub>0.01</sub> U <sub>0.01</sub> P <sub>0.86</sub> Si <sub>0.24</sub> O <sub>4.00</sub>											
2	Ce <sub>0.27</sub> Ca <sub>0.24</sub> La <sub>0.12</sub> Nd <sub>0.10</sub> Fe <sub>0.04</sub> Pr <sub>0.03</sub> Sm <sub>0.01</sub> P <sub>1.07</sub> Si <sub>0.13</sub> O <sub>4.00</sub>											
3	Ce <sub>0.54</sub> La <sub>0.32</sub> Nd <sub>0.06</sub> Pr <sub>0.05</sub> Th <sub>0.02</sub> Ca <sub>0.02</sub> P <sub>1.00</sub> O <sub>4.00</sub>											

Таблица 8

## Химический состав (мас. %) зонального кристалла циркона из копи № 418

Table 8

## Chemical composition (wt. %) of zonal zircon crystal from mine no. 418

№ ан.	SiO <sub>2</sub>	ZrO <sub>2</sub>	HfO <sub>2</sub>	UO <sub>2</sub>	ThO <sub>2</sub>	Сумма	Формула, расчёт на O = 4
1d	32.24	61.83	5.62	–	–	99.69	Zr <sub>0.95</sub> Hf <sub>0.04</sub> SiO <sub>4</sub>
2e	32.77	63.82	2.96	–	–	99.55	Zr <sub>0.95</sub> Hf <sub>0.03</sub> SiO <sub>4</sub>
3f	32.18	61.49	5.00	0.98	0.24	99.89	Zr <sub>0.93</sub> Hf <sub>0.04</sub> U <sub>0.01</sub> SiO <sub>4</sub>
4g	32.34	62.65	4.67	–	–	99.66	Zr <sub>0.94</sub> Hf <sub>0.04</sub> SiO <sub>4</sub>
5h	32.34	62.44	4.56	–	–	99.34	Zr <sub>0.94</sub> Hf <sub>0.04</sub> SiO <sub>4</sub>
6i	31.91	61.67	5.50	–	–	99.08	Zr <sub>0.94</sub> Hf <sub>0.05</sub> SiO <sub>4</sub>

Примечание. Буквы – участки анализа (см. рис. 6).

Note. Letters – areas of analysis (see Fig. 6).

HfO<sub>2</sub>), U и Th (табл. 8). В одном из кристаллов встречено включение **бадделеита** размером менее 10 мкм. Состав бадделеита, мас. %: ZrO<sub>2</sub> 83.96, SiO<sub>2</sub> 9.28, HfO<sub>2</sub> 5.99, сумма 99.23; примесь кремнезёма вызвана подсветкой циркона.

### Заключение

Впервые была изучена уникальная минеральная ассоциация жилы № 418, связанная с преобразованием гипербазитовых тел, расположенных среди метаморфических пород Ильмено-Вишнёвогорского комплекса. Из них на территории Ильменских гор ранее не были обнаружены амецит, бадделеит, герсдорфит, диссакисит-(Ce) и никелин.

Исследованные минералы можно подразделить на две группы: а) минералы, типоморфные для пород ультрамафитовой ассоциации и изменённых гипербазитов (хлорит, амецит, сульфиды и арсениды никеля); б) минералы, образовавшиеся в результате влияния флюида, обогащённого щелочными элементами и обеспечившего ремобилизацию и перераспределение Al, а также Ti, PЗЭ, редких металлов и Ba (Левицкий, 2005; Азимов, Бушмин, 2007) (корунд, шпинель, циркон, минералы редких земель и редких металлов, бариевые полевые шпаты). Подобный флюид мог образоваться на этапе тектонометаморфических деформаций (280–320 млн лет) (Краснобаев и др., 2016) в условиях нижней коры при частичном плавлении пород. Кристаллизация бариевых полевых шпатов и диаспора в поздних трещинах в корунде и хлорите свидетельствует о полистадийном воздействии высокоглиноземистого флюида.

Сходные по геологической позиции и генезису высокоглинозёмистые породы – корундовые плагиоклазиты – развиты в центральной и северной частях Ильмено-Вишнёвогорского полиметаморфического комплекса, в том числе типовые месторождения корундовых плагиоклазитов – Борзовское и 5-я верста, где они также образуют жильные тела в изменённых гипербазитах, но основными минералами жильных тел плагиоклазитов являются основные плагиоклазы (анортит), корунд, мусковит, реже шпинель и турмалин (Коптев-Дворников, Кузнецов, 1931).

### Литература

Азимов П.Я., Бушмин С.А. (2007) Растворимость минералов метаморфических и метасоматических пород в гидротермальных растворах разной кислотности: термодинамическое моделирование при 400–800 °С и 1–5 кбар. *Геохимия*, (12), 1305–1330.

Коптев-Дворников В.С., Кузнецов Е.А. (1931) Борзовское месторождение корунда: Петрологическое исследование. *Труды Ин-та прикл. минералогии* (47). М.: Техиздат, 318 с.

Краснобаев А.А., Вализер П.М., Анфилогов В.Н., Медведева Е.В., Бушарина С.В., Мурдасова Н.М. (2016) Цирконология серпентинитов Няшевского массива (Южный Урал). *Доклады Академии наук*, 471(6), 703–707.

Левицкий В.И. (2005) Петрология и геохимия метасоматоза при формировании континентальной коры. Новосибирск, ГЕО, 340 с.

Никандров С.Н., Рассомахин М.А., Нишанбаев Т.П. (2017) Список минералов Ильменских гор (на 2017 г.). *Минералогия*, 3 (1), 52–60.

Поляков В.О., Баженов А.Г., Петров В.И. (1991) Минеральные ассоциации корунда Ильменских гор. *Новые данные по минералогии эндогенных месторождений и зон техногенеза Урала*. Свердловск: УрО АН СССР, 15–21.

Hogarth D.D. (1977) Classification and nomenclature of the pyrochlore group. *American Mineralogist*, 62, 403–410.

Sorokina E.S., Rassomakhin M.A., Nikandrov S.N., Karampelas S., Kononkova N.N., Nikolaev A.G., Anosova M.O., Somsikova A.V., Kostitsyn Yu.A., Kotlyarov V.A. (2019) Origin of blue sapphire in newly discovered spinel–chlorite–muscovite rocks within meta-ultramafites of Ilmen mountains, South Urals of Russia: evidence from mineralogy, geochemistry, Rb-Sr and Sm-Nd isotopic data. *Minerals*, in press.

### References

Azimov P.Ya., Bushmin S.A. (2007) [Solubility of minerals of metamorphic and metasomatic rocks in hydrothermal solutions of varying acidity: thermodynamic modeling at 400–800 °C and 1–5 kbar]. *Geokhimiya [Geochemistry International]*, (12), 1210–1234.

Hogarth D.D. (1977) Classification and nomenclature of the pyrochlore group. *American Mineralogist*, 62, 403–410.

Koptev-Dvornikov V.S., Kuznetsov E.A. (1931) [Borзовское corundum deposit: petrological study]. Moscow, Tekhizdat, 318 p. (in Russian)

Krasnobayev A.A., Valizer P.M., Anfilogov V.N., Medvedeva E.V., Busharina S.V., Murdasova N.M., (2016) [Zirconology of serpentinites from Nyashevo massif (Southern Urals)]. *Doklady Earth Sciences*, 471(2), 1298–1302.

Levitsky V.I. (2005) [Petrology and geochemistry of metasomatism during formation of the continental crust]. Novosibirsk, GEO, 340 p. (in Russian)

Nikandrov S.N., Rassomakhin M.A., Nishanbayev T.P. (2017) [List of minerals of the Ilmeny mountains (data for 2017)]. *Mineralogiya [Mineralogy]*, 3 (1), 52–60. (in Russian)

Polyakov V.O., Bazhenov A.G., Petrov V.I. (1991) [Mineral assemblages of corundum of the Ilmeny Mountains]. *Mineral'nye assotsiatsii korunda Il'menskikh gor. Novyye dannyye po mineralogii endogennykh mestorozhdeniy i zon tekhnogeneza Urala [New data on mineralogy of endogenic deposits and zones of technogenesis of the Urals]*. Sverdlovsk, UB RAS USSR, 15–21. (in Russian).

Sorokina E.S., Rassomakhin M.A., Nikandrov S.N., Karampelas S., Kononkova N.N., Nikolaev A.G., Anosova M.O., Somsikova A.V., Kostitsyn Yu.A., Kotlyarov V.A. (2019) Origin of blue sapphire in newly discovered spinel–chlorite–muscovite rocks within meta-ultramafites of Ilmen mountains, South Urals of Russia: evidence from mineralogy, geochemistry, Rb-Sr and Sm-Nd isotopic data. *Minerals*, in press.

Статья поступила в редакцию 7 сентября 2018 г.