

**ГЕНЕТИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ КОРУНДОВЫХ  
ПЛАГИОКЛАЗИТОВ–КЫШТЫМИТОВ И МИАСКИТОВ  
ИЛЬМЕНО-ВИШНЕВОГОРСКОГО КОМПЛЕКСА,  
ЮЖНЫЙ УРАЛ, РОССИЯ:  
НОВЫЕ ДАННЫЕ Rb-Sr И Sm-Nd ИЗОТОПНОГО СОСТАВА,  
ГЕОХИМИИ И МИНЕРАЛОГИИ**

© 2019 г. М. И. Филина<sup>а,\*</sup>, Е. С. Сорокина<sup>а</sup>, М. А. Рассомахин<sup>б</sup>,  
Н. Н. Кононкова<sup>а</sup>, Ю. А. Костицын<sup>а</sup>, А. В. Сомсикова<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН  
Россия, 119991 Москва, ул. Косыгина, 19

<sup>б</sup>Ильменский государственный заповедник  
Россия, 456317 Челябинская обл., Миасс  
e-mail: makimm@mail.ru

Поступила в редакцию 04.12.2018 г.

После доработки 07.02.2019 г.

Принята к публикации 08.02.2019 г.

Получены новые данные по геохимии, минералогии и Rb-Sr и Sm-Nd изотопному составу корундовых плагиоклазитов — кыштымитов месторождения “5-я верста” (Южный Урал, Россия). На основе полученных данных показана генетическая связь миаскитов и кыштымитов. Образование последних связано с перераспределением и концентрацией алюминия, кальция, HFSE и LIL-элементов на этапе тектоно-метаморфических деформаций Ильмено-Вишневогорского щелочно-го комплекса.

**Ключевые слова:** корундовые плагиоклазиты, кыштымиты, миаскиты, геохимия корунда, Ильмено-Вишневогорский щелочной комплекс

DOI: 10.31857/S0016-7525647742-749

## ВВЕДЕНИЕ

Корунд  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  является типичным минералом многих магматических и метаморфических пород. Однако его разновидность синего цвета — сапфир, окрашенная ионами  $\text{Fe}^{3+}$  и/или  $\text{Fe}^{2+}/\text{Ti}^{4+}$ , встречается только в породах, обогащенных глиноземом и обедненных кремнеземом (Giuliani et al., 2014). При этом добыча ювелирных сапфиров сконцентрирована преимущественно в россыпных месторождения, генезис которых во многом остается дискуссионным. Поэтому исследование генетической природы минерала, обнаруженного *in situ* в коренных породах, может помочь решить фундаментальную проблему петрогенезиса синего сапфира на вторичных россыпных объектах.

Исследованное месторождение корунда-наждака “5-я верста” на Южном Урале было открыто А.П. Карпинским в 1883 году (Клер, 1918).

В 1910 г. оно было описано А.В. Николаевым, где в ходе разведки было обнаружено три залежи кыштымита — корундсодержащей разновидности плагиоклазитов (плутонической основной породы нормального ряда из семейства габброидов, сложенной до 95% плагиоклазом). Эксплуатация месторождения велась до 1930 года. Намного раньше, в 1823 году, при осмотре отвалов золотого рудника на р. Борзовке профессором Казанского университета К.Ф. Фуксом были встречены и описаны аналогичные жилы кыштымита (впоследствии это месторождение корунда-наждака стало называться Борзовским; Коптев-Дворников и др., 1931; Колесник и др., 1974; Колесник, 1976).

Корундовые плагиоклазиты описаны в крупном расслоенном комплексе Ситтампунди (Индия), где они представлены метаморфизованными породами архейского возраста (Karmakar et al., 2017). Корундовые плагиоклазиты также

встречены в комплексе Черных Гигантов, Новая Зеландия. Комплекс является частью Туоанского орогенного пояса и был подвергнут многофазному метаморфизму амфиболитовой фации в девоне и карбоне (Gibson et al., 1979). Еще одно проявление корундовых плагиоклазитов было описано в поясе альпийского типа Чунки Гал-Маунтин (Северная Каролина, США) в ассоциации с амфиболитами и перидотитами (Pratt, 1906; McElhaneу, McSween, 1983).

Несмотря на открытие два столетия назад на Южном Урале крупных массивов корундовых плагиоклазитов-кыштымитов, их минералогия и геохимия остаются во многом неизученными, а теории их генетической природы образования до настоящего времени являются предметом дискуссий.

### ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ПОЛОЖЕНИЕ

Жилы плагиоклазитов “5-й версты” расположены северо-восточнее Борзовского месторождения и практически граничат с восточным флангом Вишневогорского массива. На этом участке среди кварцито-сланцев метатерригенной сайтовской серии обнажены тела метагипербазитов с линзами корундовых плагиоклазитов. Сайтовская серия является одним из структурно-вещественных подразделений Ильмено-Вишневогорской полиметаморфической зоны, являющейся глубинным фрагментом регионального постколлизийного сдвига (Русин и др., 2006). Возраст метагипербазитов (SHRIMP U-Pb геохронология циркона) отражает сложную эволюцию формирования пород: ~1.3 млрд лет, возможно, отражает возраст мантийного протолита; ~460–420 млн лет — этапы метаморфической эволюции, связанные с внедрением основных интрузивных тел карбонатитов и миаскиотов (лейкократовая разновидность нефелиновых сиенитов, обнаруженная впервые недалеко от г. Миасс) Ильмено-Вишневогорского комплекса, ~320–280 млн лет — коллизийные процессы (Краснобаев и др., 2008).

Исследованная жила кыштымитов представляет собой линзовидное тело, вскрытое выработкой мощностью около 3 м. Метагипербазиты, сложенные преимущественно энстатитом, являются вмещающими породами. На контакте вмещающих пород и кыштымитов присутствует реакционная кайма (10–25 см), состоящая из хризотил-асбеста.

Миаскиты Вишневогорского массива, граничащие с кыштымитами “5 версты”, состоят из

калиевого полевого шпата (20–60 об.%), нефелина (20–30 об.%), лепидомелана (5–20 об.%), амфибола (до 20 об.%) и кислого плагиоклаза (до 20 об.%). Дополнительно в миаскитах встречаются кальцит (до 3 об.%), канкринит и содалит (Арсланова и др., 1978).

### МИНЕРАЛОГИЯ, ГЕОХИМИЯ, Rb-Sr И Sm-Nd ИЗОТОПНЫЕ ДАННЫЕ

Минералы породы диагностированы методом спектроскопии координационного рассеивания (Рамановской спектроскопии) на приборе Renishaw in Via. Химические составы минералов определены методом электронно-зондового микроанализа на приборе Cameca SX100 с 4 волновыми спектрометрами (ускоряющее напряжение 15 кV, ток зонда 30 nA). Кыштымит состоит из идиоморфных зерен корунда (до 50 об.%), плагиоклаза (40–50 об.%); до 10 об.% породы составляют мусковит, клинохлор и клиноцоизит. Среди аксессуарных минералов присутствует циркон, чёрчит-(Y) и минералы группы апатита. Структура породы порфировидная: крупные кристаллы корунда располагаются среди мелкозернистой массы других минералов (рис. 1).

Кристаллы корунда размером 1–7 мм дипирамидально-призматического габитуса вытянуты по оси с (рис. 1). У кристаллов наиболее развиты грани гексагональной призмы ( $11\bar{2}0$ ), пинакоида (0001) и гексагональной дипирамиды ( $22\bar{4}3$ ). Корунд имеет характерную магматическую осцилляционную зональность, проявленную в бесцветных и ярко-синих (прозрачных) чере-

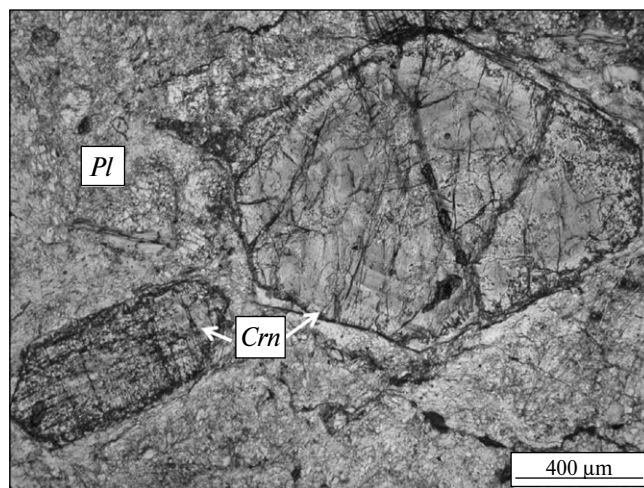


Рис. 1. Дипирамидально-призматические кристаллы корунда (Crn) в мелкозернистой плагиоклазовой (Pl) матрице.

дующихся зонах. Синий цвет минерала связан с ионами  $Fe^{3+}$ , замещающими ионы  $Al^{3+}$  в октаэдрических позициях структуры минерала, и/или с присутствием обменно-связанных пар ионов  $Fe^{2+} + Ti^{4+} \leftrightarrow Al^{3+}$ . Плаггиоклаз образует мелкозернистую массу, равномерно распределенную по всему объему породы. Состав плаггиоклаза варьирует от лабрадора до анортита —  $An_{61-93}$ . Мусковит образует мелкочешуйчатые кристаллы размером 0.1–0.2 мм, встречается в ассоциации с клинохлором и клиноцоизитом. Повышенные содержания магния в мусковите (до 1.71 мас.%) и калия в клинохлоре (до 7.11 мас.%) связаны с процессом замещения мусковита клинохлором. Клиноцоизит обнаружен в виде небольших округлых зерен размером до 0.1 мм, замещающих плаггиоклаз. В составе клиноцоизита присутствует примесь железа до 2.07 мас.%. Чёрчит-(Y) образует небольшие ксеноморфные кристаллы размером 30–70 мкм, обычно встречающиеся в виде микровключений в корунде. Кроме того, чёрчит-(Y) обнаружен в сростании с Ce, La, Nd-фосфатом и апатитом.

По петрографическим наблюдениям определена последовательность минералообразования в кыштымитах: корунд → плаггиоклаз → мусковит + клиноцоизит → клинохлор. Так, на магматической стадии образовался корунд как наиболее высокотемпературный минерал системы, затем, с понижением температуры, кристаллизовался плаггиоклаз. Данная последовательность кристаллизации согласуется с петрологическим моделированием фаз в системе  $CaO-SiO_2-Al_2O_3-MgO$  (рис. 2; Tang et al., 2015). Далее, на метасоматической стадии при дальнейшем снижении температуры и/или давления и с привнесением калия в систему образовался мусковит, который является более низкотемпературной фазой по сравнению с корундом и полевым шпатом (рис. 3), а также клиноцоизит, частично замещавший плаггиоклаз. Клинохлор формировался на заключительном этапе метасоматической стадии. Его образование происходило за счет замещения мусковита и привнесения Mg в систему из вмещающих метагипербазитов при их переработке метасоматическими флюидами.

В табл. 1 приведены данные рентгенофлуоресцентного анализа (спектрометр AXIOS Advanced, PAN alytical B.V.). Содержание  $SiO_2$  в кыштымите варьирует от 40.84 до 42.72 мас.%,  $Al_2O_3$  — от 34.76 до 42.94 мас.%,  $CaO$  — от 5.89 до 15.79 мас.%, содержание щелочей ( $Na_2O + K_2O$ ) варьирует от 1.58 до 5.03 мас.%,  $MgO$  — от 0.60 до 2.86 мас.%. На классификационной диаграмме

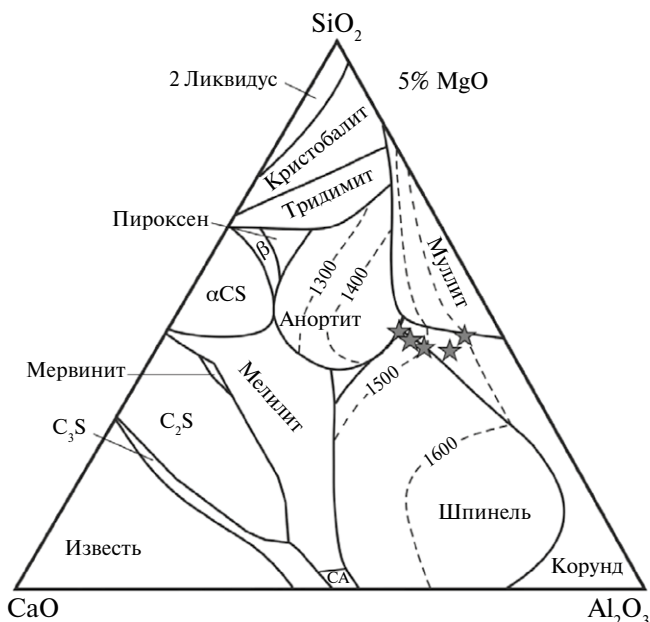


Рис. 2. Фазовая диаграмма  $CaO-SiO_2-Al_2O_3-MgO$  (по Tang et al., 2015). Звездочками обозначены валовые составы кыштымитов.

магматических горных пород (по Cox et al., 1979) химические составы кыштымита попадают в поля щелочных горных пород йолитов и щелочных габбро. Порода характеризуется чрезвычайно высоким индексом насыщенности алюминия —  $ASI (Al_2O_3 / (CaO + Na_2O + K_2O) \text{ мол.}) = 1.12-2.32$ .

На рис. 4, 5 показаны распределения REE; измерение REE проведено с помощью метода масс-спектрометрии с индуктивно-связанной

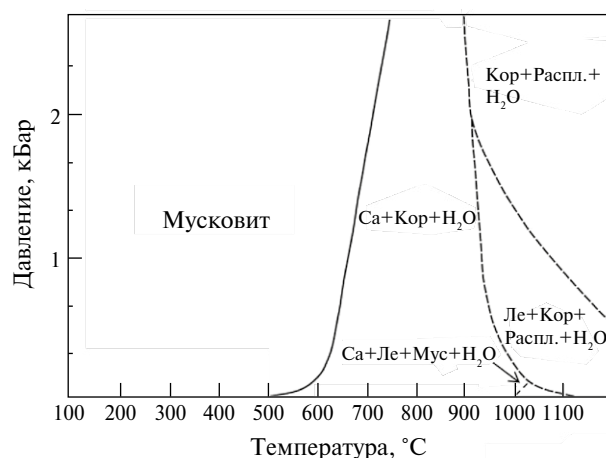


Рис. 3. Равновесная кривая (сплошная линия) для реакции Мусковит (Мус) ↔ Са (санидин) + Кор (корунд) +  $H_2O$ , а также оценки равновесной кривой для плавления санидина и лейцита (штрихованные линии) в ассоциации мусковита и одно возможное отношение в ассоциациях  $Ca+Kop+H_2O$  и  $Ca+Le$  (Лейцит) +  $Musc+H_2O$  (Yoder, Eugster, 1955).

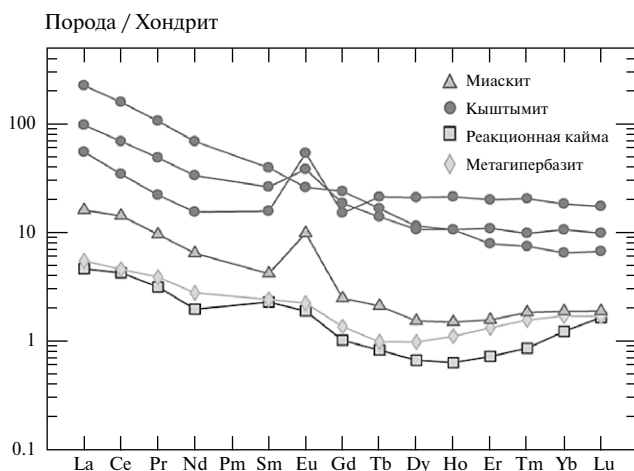
**Таблица 1.** Химические составы кыштымитов “5-й версты” и миаскитов Ильмено-Вишневогорского комплекса (мас.%)

Компонент	Кыштымит					Миаскит*	
	6-к	8-к	12-к	16КС4	13-к	миаск-1	миаск-2
SiO <sub>2</sub>	42.37	42.72	40.84	41.56	41.24	58.67	60.34
TiO <sub>2</sub>	0.04	0.10	0.07	0.08	0.13	0.85	0.25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	34.76	36.77	42.94	35.33	42.77	22.76	22.49
FeO <sub>tot</sub>	0.35	1.20	0.11	0.56	0.46	2.05	1.38
MnO	0.01	0.01	—	—	0.01	0.06	0.04
MgO	1.61	2.52	0.60	2.86	1.11	0.33	0.20
CaO	15.79	11.23	7.46	13.82	5.89	0.58	0.52
Na <sub>2</sub> O	1.08	2.17	4.01	0.82	3.98	8.95	8.86
K <sub>2</sub> O	0.50	0.99	0.98	1.29	1.05	4.38	4.42
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.06	0.07	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04
S	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.30	0.28
ппп	2.51	1.44	2.42	2.96	2.71	0.57	0.69
Сумма	99.11	99.24	99.49	99.34	99.41	99.53	99.51

Примечания. «—» — ниже предела обнаружения. \* — миаскит Ишкульского участка Ильмено-Вишневогорского комплекса.

плазмой на приборе Agilent 7500. На графике распределения REE, нормализованных к хондриту, наблюдается основной тренд — обогащение LREE по сравнению с HREE, схожий с трендом распределения REE в миаскитах. При этом кыштымиты более обогащены REE по сравнению с миаскитами. Некоторые образцы кыштымитов и миаскитов показывают отчетливую положительную аномалию по Eu (рис. 4). Графики распределения химических элементов, нормализованных к примитивной мантии, показаны на рис. 5. Кыштымиты имеют отчетливые

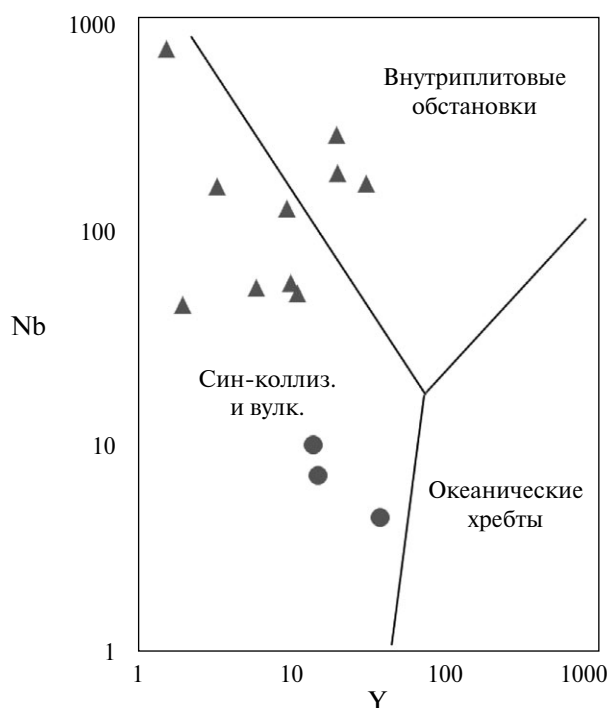
аномалии по U, Th, Nb, Pb, Sr и Ti (рис. 5). Аномалии Eu и Sr объясняются накоплением этих элементов в плагиоклазе, при этом аномалии U и Th связаны с присутствием этих микроэлементов в цирконе, тогда как отрицательная аномалия Nb связана с отсутствием Nb-содержащих фаз в породе. Вмещающие метагипербазиты, по сравнению с миаскитами и кыштымитами, обеднены REE и имеют более пологую кривую с менее выраженным обогащением LREE.



**Рис. 4.** Нормированные к хондриту (Sun, McDonough, 1989) графики распределения концентраций редкоземельных и рассеянных элементов в кыштымите, вмещающих метагипербазитах, реакционной кайме между метагипербазитом и кыштымитом, а также в миаските Ильмено-Вишневогорского комплекса (Ишкульский участок).



**Рис. 5.** Нормированные к примитивной мантии (Sun, McDonough, 1989) графики распределения концентраций редких и рассеянных элементов в кыштымите, вмещающих метагипербазитах, реакционной кайме между метагипербазитом и кыштымитом, а также в миаските Ильмено-Вишневогорского комплекса (Ишкульский участок).



**Рис. 6.** Диаграмма Y к Nb (по Pearce et al., 1984; Eby et al., 1998) с нанесенными составами кыштымитов (кружки) и миаскитов Вишневогорского комплекса (треугольники). Химические составы миаскитов (по данным Недосековой и др., 2009, и неопубликованным данным Медведевой). Син-коллиз. — породы, сформированные при син-коллизийных процессах; Вулк. — породы, сформированные в вулканических дугах.

Для кыштымитов характерны умеренные и высокие фракционированные распределения REE  $(La/Yb)_N = 4.20-48.12$  с небольшим максимумом Eu  $(Eu/Eu^* = 1.02-1.32)$ .

На диаграмме Y к Nb показано, что составы кыштымитов и миаскитов Вишневогорского массива попадают в область формирования пород при синколлизийных процессах (Eby et al., 1998; рис. 6). При этом образцы миаскитов попадают или находятся вблизи границы пород, возникших при внутриплитовом магматизме (вынос некоторого количества Y из миаскитов, скорее всего, связан с дальнейшим развитием щелочного комплекса и его изменением тектоно-метаморфическими процессами).

В табл. 2 приведены данные Rb-Sr и Sm-Nd изотопного анализа кыштымитов с использованием мультиколлекторного масс-спектрометра с термической ионизацией Finnigan Triton (Thermo Fisher Scientific). Содержание Sr в кыштымите составляет 1272–3799 ppmw, содержание Rb — около 19–31 ppmw. Начальные изотопные отношения  $^{87}Sr/^{86}Sr$  для изученных кыштымитов, пересчитанные на 280 млн лет (возраст заключительного этапа коллизийных процессов), составляют 0.706371 – 0.706936. Начальные изотопные отношения  $(^{143}Nd/^{144}Nd)_{280}$ , пересчитанные на 280 млн лет, составляют 0.5119-0.5122,  $\epsilon Nd (T)$  варьирует от -1.9 до -7.9. Подобные отношения  $^{87}Sr/^{86}Sr$  и низкий  $\epsilon Nd$  характерны для коровых условий образования исследованных образцов кыштымитов. Так, на диаграмме  $\epsilon Nd (T)$  к  $\epsilon Sr (T)$  для пород Ильмено-Вишневогорского-комплекса (рис. 7), 3 точки находятся за границей мантийных резервуаров, 1 точка находится в области мантийного резервуара EM2. Последнее, вероятно, связано с переработкой первичных плагиоклазитов и выносом радиоактивного стронция, однако, для окончательных выводов требуются дополнительные исследования.

**Таблица 2.** Rb-Sr и Sm-Nd изотопные данные для кыштымитов Ильмено-Вишневогорского массива

Характеристика	Образец				
	3-к*	6-к	8-к	12-к	13-к
Rb, ppm	21.5	19.4	28.8	30.2	31.9
Sr, ppm	1272	3799	2699	2830	2661
$^{87}Rb/^{86}Sr^{**}$	0.0488	0.0147	0.0309	0.0309	0.0347
$^{87}Sr/^{86}Sr$	0.706566	0.706665	0.706844	0.707024	0.707074
$\pm 2\sigma$	0.000007	0.000012	0.000010	0.000008	0.000020
$(^{87}Sr/^{86}Sr)_{280}$	0.706371	0.706607	0.706721	0.706901	0.706936
$\epsilon Sr (T)$	26.6	29.9	31.5	34.1	34.6
Sm, ppm	8.01	4.28	63.34		8.89
Nd, ppm	48.27	12.93	324.35	—	33.99
$^{147}Sm/^{144}Nd$	0.1004	0.2002	0.1181	—	0.1582
$\pm 2\sigma$	0.000007	0.000009	0.000008	—	0.000007
$(^{143}Nd/^{144}Nd)_{280}$	0.5122	0.5120	0.5119	—	0.5119
$\epsilon Nd (T)$	-1.9	-5.9	-7.9	—	-6.9

Примечания. 3-к, 6-к, 8-к, 12-к, 13-к — кыштымит; \* — ошибка измерения  $2\sigma$   $^{87}Rb/^{86}Sr = 1\%$ , ошибка измерения  $2\sigma$   $^{147}Sm/^{144}Nd = 0.1\%$ .

## ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Проблема генезиса кыштымитов Южного Урала исследовалась с начала XX века (Ферман, 1940; Коржинский, 1953, и др.) и наиболее подробно рассмотрена в работах Ю.Н. Колесника (Колесник и др., 1974; Колесник, 1976) на примере Борзовского месторождения. Последний связывает образование кыштымитов с метасоматическими процессами, происходящими при внедрении даек гранитоидов в ультраосновные породы. Так, в одном из забоев наблюдалось развитие корундового анортозита на зальбанде дайки аплитовидного гранита с участками пегматоидного строения (Коптев-Дворников и др., 1931). Однако источники алюминия и кальция, необходимые для формирования массивов корундовых плагиоклазитов-кыштымитов, до настоящего времени являются дискуссионными.

Нами были впервые получены данные о Rb-Sr и Sm-Nd изотопным составе породы, получены новые минералогические, геохимические данные, которые показывают, что образование высокоглиноземистых ассоциаций в пределах Ильмено-Вишневогорского полиметаморфического комплекса связано с концентрацией алюминия, кальция, HFSE и LIL-элементов при формировании нефелин-сиенитового (миаскитового) щелочного массива на этапе 440–420 млн лет (возраст магматизма по Краснобаеву и др., 2008). В дальнейшем на этапе тектоно-метаморфических деформаций 280–320 млн лет назад (возраст регионального метаморфизма по Краснобаеву и др., 2008) в условиях земной коры формируется магма, генетически связанная с миаскитами и обогащенная алюминием, кальцием и щелочными элементами. Данная магма обеспечивала ремобилизацию и перераспределение алюминия, кальция, HFSE и LIL-элементов.

Согласно полученным ранее данным, к высокоглиноземистым образованиям, генетически связанным с массивами миаскитов и возникшим на этапе коллизионных процессов, относятся корундовые сиенит-пегматиты Ильменогорского щелочного массива (жилы 298, 299, 311 и 349; Sorokina et al., 2017; Sorokina et al., 2016) и корундосодержащие метасоматиты во вмещающих метагипербазитах сайтовской серии Ильменогорского метаморфического комплекса (жила 418, Sorokina et al., 2019). На генетическую связь кыштымитов и миаскитов указывают обнаруженные в кыштымитах твердофазовые микровключения Y-содержащих фаз (чёрчита-(Y) в ассоциации с апатитом и REE-фосфатом, диагностированные ранее в миаскитах Вишневогорского массива (Еськова и др., 1964),

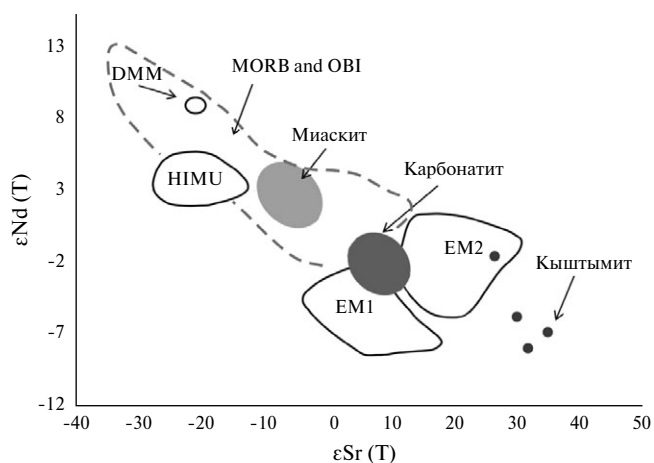


Рис. 7. Диаграмма  $\epsilon Sr (T)$  к  $\epsilon Nd (T)$  для кыштымитов и миаскитов Ильмено-Вишневогорского комплекса (Недосекова и др., 2009). На диаграмме показаны мантийные резервуары DMM, HIMU, EM1, EM2, MORB и OBI (по данным Hofmann, 1997).

чрезвычайно высокие содержания  $Al_2O_3$  в кыштымитах (до 42.94 мас.%) и в миаскитах Ильмено-Вишневогорского комплекса (до 22.76 мас.%), похожий характер распределения REE (обогащение LREE по сравнению с HREE, наличие положительной аномалии по Eu — рис. 4; аномалии по U, Nb, Pb, Sr и Ti — рис. 5). Так, комагматичный генезис плагиоклазитов и сиенитов был ранее обнаружен на массиве Адирондак (США): Rb-Sr изотопные значения в сиените и плагиоклазите образуют одну изохрону с возрастом 1 млрд лет (Health, 1967).

В кыштымитах Ильмено-Вишневогорского комплекса образование корунда как наиболее высокотемпературного минерала системы происходило непосредственно из магмы при ее пересыщении алюминием (Morozewicz, 1898). Согласно работе (Morozewicz, 1898), кристаллизация корунда из алюмосиликатного расплава возможна при значении  $nSiO_2 < 6$  для составов с общей формулой  $(Ca, K_2, Na_2)O \cdot Al_2O_3 \cdot nSiO_2$ ; в изученных образцах кыштымита значения  $n$  варьировали от ~1 до 2,5 (при значении  $nSiO_2 > 6$  образуются алюмосиликаты). Далее, при понижении температуры кыштымитовой магмы кристаллизовался анортит. Образование более низкотемпературных минералов кыштымитов (мусковита, клиноцоизита и клинохлора) происходило в метасоматическую стадию минералообразования.

## Благодарности

Авторы благодарят академика РАН д.г.-м.н. Л.Н. Когарко (ГЕОХИ РАН), Prof. Dr. P. Бочарникова (Johannes Gutenberg University Mainz, Герма-

ния), а также рецензентов д.г.-м.н. О.А. Луканина (ГЕОХИ РАН) и к.г.-м.н. В.М. Козлоского (ИГЕМ РАН) за ценные комментарии к рукописи; к.г.-м.н. Е.В. Медведеву (Ильменский государственный заповедник) за предоставленные химические анализы миаскитов. Авторы признательны сотрудникам ГЕОХИ РАН (к.г.-м.н. В.Н. Ермолаева, к.ф.-м.н. Т.Г. Кузьмина, Т.В. Ромашова и В.А. Турков) и МГУ им. Ломоносова (к.г.-м.н. Я.В. Бычкова) за помощь в пробоподготовке и аналитических исследованиях образцов кыштымитов и миаскитов.

### Источник финансирования

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации (№ проекта МК-4459.2018.5).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Арсланова Х.А., Голубчина М.Н., Искандерова А.Д. (1978) Геологический словарь: в 2-х томах под ред. К.Н. Паффенгольца. 2-е изд., испр. М.: Недра.
- Еськова Е.М., Жабин А.Г., Мухитдинов Г.Н. (1964) Минералогия и геохимия редких элементов Вишневых гор. М.: Наука, 318 с.
- Клер М.О. (1918) Корунды и наждаки на Уралъ, Уральскій техник, 7–9, 1–17.
- Коптев-Дворников В.С., Кузнецов Е.А. (1931) Борзовское месторождение корунда: Петрологическое исследование. Москва, Техиздат, 320 с.
- Колесник Ю.Н. (1976) Высокотемпературный метасоматоз в ультраосновных массивах, 240.
- Колесник Ю.Н., Королюк В.Н., Лаврентьев Ю.Г. (1974) Шпинели и рудные минералы Борзовского месторождения корундовых плагиоклазитов. *Записки Всесоюзного Минералогического Общества* 103(3), 373–378.
- Коржинский Д.С. (1953) Очерк метасоматических процессов В кн.: Основные проблемы в учении о магматогенных рудных месторождениях. 332–450 с.
- Краснобаев А.А., Пужаков Б.А., Петров В.И., Бушарина С.В. (2009) Цирконология метаморфитов кыштымской-аракульской толщ сысертско-ильменогорского комплекса. *Труды Института геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого* 156, 264–268.
- Недосекова И.Л., Владыкин Н.В., Прибакин С.В., Баянова Т.Б. (2009) Строение Ильмено-Вишневогорского маискит-карбонатитового комплекса: происхождение, рудоносность, источники вещества (Урал, Россия). *Геология рудных месторождений* 51(2), 157–181.
- Русин А.И., Краснобаев А.А., Вализер П.М. (2006) Геология Ильменских гор: ситуация и проблемы. *Геология и минералогия Ильменогорского комплекса: ситуация и проблемы. Миасс: ИГЗ УрО РАН*, 3–19.
- Ферсман А.Е. (1940) Пегматиты, 712 с.
- Cox K.G., Bell J.D, Pankhurst R.J. (1979) The Interpretation of Igneous Rocks. London, U.K.
- Eby G.N., Woolley A.R., Din V., Platt G. (1998) Geochemistry and Petrogenesis of Nepheline Syenites: Kasungu–Chipala, Ilomba, and Ulindi Nepheline Syenite Intrusions, North Nyasa Alkaline Province, Malawi. *J. Petrol.* 39(8), 1405–1424.
- Gibson G.M. (1979) Margarite in Kyanite- and Corundum-Bearing Anorthosite, Amphibolite, and Hornblendite From Central Fiordland, New Zealand. *Contrib. Miner. Petrol.* 68 171–179.
- Hofmann A.W. (1997) Mantle geochemistry: the message from oceanic volcanism. *Nature.* 385, 219–229.
- Karmakar S., Mukherjee S., Sanyal S., Sengupta P. (2017) Origin of peraluminous minerals (corundum, spinel, and sapphirine) in a highly calcic anorthosite from the Sittampundi Layered Complex, Tamil Nadu, India. *Contrib. Mineral. Petrol.* 172, 67.
- Giuliani G., Caumon G., Rakotosamizanany S., Ohnenstetter D., Rakotondrazafy M. (2014) Classification chimique des corindons par analyse factorielle discriminante: application a la typologie des gisements de rubis et saphirs. *Revue de Gemmologie.* 188, 14–22.
- Heath S.A. (1967) Sr<sup>87</sup>/Sr<sup>86</sup> ratios in anorthosites and some associations rocks. Submitted and in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy. 108 p.
- McDonough W.F., Sun S.S. (1995) The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120, 22.
- McElhane M.S., McSween H.Y. (1983) Petrology of the Chunky Gal Mountain mafic-ultramafic complex, North Carolina. *GSA Bulletin* 94(7), 855–874.
- Morozewicz J.I. (1898) Experimentelle Untersuchungen über die Bildung der Minerale im Magma. *Tschermaks mineralogische und petrographische Mitteilungen*, 18(1), 1–90.
- Pearce J.A., Harris N.B.W., Tindle A.G. (1984) Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *J. Petrol.* 25, 956–983.
- Pratt G.H. (1906) Corundum and Its occurrence and distribution in the United States.
- Sun S.S., McDonough W.F. (1989) Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geological Society, Special Publications* 42, 313–345.
- Sorokina E.S., Koivula J.I., Muyl J., Karamelas S. (2016) Multiphase fluid inclusions in blue sapphires from the Ilmen Mountains, southern Urals. *Gems Gemol.* 52, 209–211.
- Sorokina E.S., Karamelas S., Nishanbaev T.P., Nikandrov S.N., Semiannikov B.S. (2017) Sapphire megacrysts in syenite pegmatites from the Ilmen Mountains, South Urals, Russia: New mineralogical data. *Can. Mineral.* 55(5), 823–843.
- Sorokina E.S., Rassomakhin M.A., Nikandrov S.N., Karamelas S., Kononkova N.N., Nikolaev A.G., Anoso-



va M.O., Orlova A.V., Kostytsyn 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*. **9**(1), 36.

Tang H., Wu T., Wang J-I., Liang Y-C., Li J. (2015) Mass Action concentration model of CaO–MgO–FeO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> slag systems and its application to the formation mechanism of MgO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> spinel-type inclusion in casing steel. *Metallurgical Research Technology*. **112**, 409.

Yoder H.S., Eugster H.P. (1955) Syntetic and natural muscovites. *Geochem. Cosmochim. Acta*. **8**, 225–290.

## GENETIC LINKAGE OF CORUNDUM PLAGIOCLASITES–KYSHTYMITES AND MIASKITES OF THE ILMENOGORSKY–VISHNEVOGORSKY COMPLEX, SOUTH URALS, RUSSIA: NEW Rb–Sr AND Sm–Nd ISOTOPIC, GEOCHEMICAL AND MINERALOGICAL DATA

© 2019 M. I. Filina<sup>a,\*</sup>, E. S. Sorokina<sup>a</sup>, M. A. Rassomakhin<sup>b</sup>, N. N. Kononkova<sup>a</sup>, Yu. A. Kostitsyn<sup>a</sup>, A. V. Somsikova<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical chemistry Russian Academy of Sciences (GEOKHI RAS)

<sup>b</sup>Ilmen State Reserve

\*e-mail: makimm@mail.ru

Received: 04.12.2018

Received version received: 07.02.2019

Accepted: 08.02.2019

New geochemical, mineralogical, and Rb–Sr and Sm–Nd isotopic data have been obtained on corundum plagioclases–kyshtymites from the 5th Versta deposit (South Urals, Russia). The genetic link of miaskites and kyshtymites is shown. The formation of the kyshtymites is associated with the redistribution and accumulation of aluminum, calcium, HFSE, and LIL-elements at the stage of tectonic–metamorphic deformations of the Ilmenogorsky–Vishnevogorsky alkaline complex.

**Keywords:** corundum plagioclases, kyshtymites, miaskites, corundum geochemistry, Ilmenogorsky–Vishnevogorsky alkaline complex

**(For citation:** Filina M.I., Sorokina E.S., Rassomakhin M.A., Kononkova N.N., Kostitsyn Yu.A., Somsikova A.V. Genetic Linkage of Corundum Plagioclases–Kyshtymites and Miaskites of the Ilmenogorsky–Vishnevogorsky Complex, South Urals, Russia: New Rb–Sr and Sm–Nd Isotopic, Geochemical and Mineralogical Data. *Geokhimiya*. 2019;64(7):742–749. DOI: 10.31857/S0016-7525647742-749)