

САПФИРИН-ШПИНЕЛЕВЫЕ ГОРНБЛЕНДИТЫ ИЛЬМЕНО-ВИШНЕВОГОРСКОГО КОМПЛЕКСА

© 2017 г., В. Г. Кориневский, Е. В. Кориневский, В. А. Котляров, С. М. Лебедева,
И. А. Блинов, А. Б. Миронов, М. В. Штенберг

*Институт минералогии УрО РАН
456317 г. Миасс, Челябинская область
E-mail: vgkor@mineralogy.ru*

Поступила в редакцию 29.02.2016 г.

Принята к печати 12.08.2016 г.

Сведены воедино разрозненные сведения о сапфириносодержащих породах Урала. Показана их принадлежность к генетически различающимся образованиям. Это – магматические породы (горнблендиты, габброиды), тела эклогитов и эклогитоподобных пород, высокометаморфизованные палеозойские бокситы (наждаки). Дана наиболее полная петрографическая и минералогическая характеристика ортопироксенитов и сапфири-шпинелевых горнблендитов, залегающих в виде глыб-включений в линзах серпентинитового меланжа в пределах Ильмено-Вишневогорского комплекса. Впервые приведены данные рентгеновской, мессбауэровской и инфракрасной спектроскопии сапфирина из горнблендитов, химические составы большинства минералов породы. Авторы считают сапфири-шпинелевые горнблендиты Тайгинского участка породами магматическими.

Ключевые слова: *шпинель, сапфирин, хёгбомит, шриланкит, ортопироксениты, горнблендиты, Ильмено-Вишневогорский комплекс, Урал.*

ВВЕДЕНИЕ

Прошло почти 200 лет со времени обнаружения в Западной Гренландии высокоглиноземистого магнезиально-железистого силиката – сапфирина $(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_8(\text{Al}, \text{Si})_6\text{O}_{20}$ [46]. С тех пор он найден на всех континентах, но по-прежнему считается редким минералом [22, 40]. В наиболее известных интернет-ресурсах (RRUFF Database, Mindat.org., ATHENA Mineralogy и др.) и минералогических справочниках упоминаний о находках сапфирина в России или вообще нет [40, 46], или они крайне малоинформативны [22]. Первое сообщение о сапфирине в России (на Урале) появилось в 1933 г. [23], но до сих пор число публикаций о нем на территории бывшего СССР мало [1, 5, 8, 9, 20, 22, 29, 57, <http://database.iem.ac.ru/sapphirine>].

На фоне многочисленных публикаций о сапфириновых породах зарубежья состояние изученности этих специфических пород в России надо признать недостаточным. Наиболее полной является сводка по сапфириносодержащим породам Кольского полуострова [5], в которой детально рассмотрены вещественный состав, условия их формирования, соотношения с другими образованиями. В базе данных по сапфиринам России [<http://database.iem.ac.ru/sapphirine>] приводятся химические анализы этого минерала по Алдану, Балтийскому щиту, Кольскому полуострову, Прибайкалью и Джугджуро-Становой

области. В остальных разрозненных российских изданиях в очень кратком виде приводились сведения об оптических и рентгеновских свойствах, химическом составе сапфирина или результаты экспериментов по выяснению пределов его устойчивости [6, 25], предлагались противоречивые сведения о происхождении пород [29], мало говорилось о составах сопутствующих минералов. Новые данные по сапфириновым породам Урала и ревизия прежних находок позволяют дать более полную характеристику как самому сапфиру, так и вмещающим его редким разновидностям пород.

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ САПФИРИНСОДЕРЖАЩИХ ПОРОД

Из обзора имеющихся литературных данных можно заключить, что сапфирин – минерал полифациальный. Наибольшее число его находок зарегистрировано в гнейсах гранулитовой фации метаморфизма, слагающих целые толщи [5, 22, 25, 33, 44, 47, 55, 67, 70, 71]. Неоднократно сапфирин обнаруживался в ксенолитах гнейсов и сланцев гранулитовой фации, в телах кимберлитов, лампрофиров, габброидов, гипербазитов [37, 50, 56, 58]. Вероятно, по условиям образования к ним близки сапфириносодержащие наждаки (контактово-метаморфизованные бокситы) [2, 23] и подвергнутые Ca-Si инфильтрационному метасоматозу бок-

ситы или богатые Al_2O_3 осадочные породы [59]. В свою очередь сапфирин входит и в состав включений ультрамафитов и мафитов в гранулитовых породах [32, 65]. Линзовидные тела эклогитов и эклогитоподобных пород (габброидов) в серпентинизированных гипербазитах в высокотемпературных толщах иногда также являются сапфиринсодержащими [1, 8]. К числу наиболее редких разновидностей сапфириновых пород относятся в разной степени метаморфизованные основные и ультраосновные породы, имеющие признаки интрузивного происхождения [29, 35, 42, 49, 64, 66, 69, 72]. Описаны находки сапфирина в согласных телах магнезиальных скарнов, замещающих прослой магнетитов среди глубоко метаморфизованных биотитовых и гранат-биотитовых гнейсов горанской свиты на Юго-Западном Памире [9]. Скарны представляли собой первоначально шпинель-энстатитовые породы, в которых впоследствии шпинель замещалась сапфирином, а все первичные минералы (шпинель и энстатит) – флогопитом и антофиллитом. Отмечены весьма глубинные высокотемпературные условия формирования таких ассоциаций.

Общим для всех видов сапфиринсодержащих пород являются их чрезвычайно высокие глиноземистость и магнезиальность, крайне низкая кремнекислотность и очень высокие термобарические условия формирования. По данным экспериментов и геотермобарометрии сапфирин устойчив при высоких, но меняющихся, значениях температуры и давления – от 800°C при 6–7 кбар до 1250°C при 15 кбар [31, 39, 51, 56, 58, 59, 67, 71]. По результатам других экспериментов сапфирин устойчив начиная от 950°C при 20 кбар до 1400°C при 32 кбар [6].

САФИРИНСОДЕРЖАЩИЕ ПОРОДЫ УРАЛА

Краткие сведения о сапфиринсодержащих породах Урала приведены в работе [30]. Первой упоминается находка сапфирина на Прииртяшском месторождении наждака в Челябинской области [23]. Здесь вдоль восточного берега оз. Иртяш протягивается мощная толща палеозойских метаморфических пород, в которой хлоритовые сланцы перемежаются с мраморами, мощность которых местами достигает 1000 м. Сапфирин обнаружен в элювии на темно-зеленых до синего цвета массивных мелко- и среднезернистых пирит-корундовых породах (наждаках). Корунд в них занимает 60–70% объема. Кроме пирита, в наждаке в незначительных количествах присутствуют пирротин, халькопирит, рутил и диаспор. Рудные тела наждака в виде линз мощностью до 30 м и протяженностью 5–100 м залегают в белых и серых мраморах. Предполагают, что наждаки представляют собой продукт термального метаморфизма палеозойских бокситов со стороны расположенного поблизости позднепалеозойского гранитного интрузива. Поскольку сапфирин

обнаружен в шлихах из элювия, соотношения его с окружающими минералами не выяснены.

Подобные наждаки, содержащие сапфирин, описаны также в составе ксенолитов в мафитах и ультрамафитах комплекса Кортленд в США [50]. Предполагается, что эта ассоциация минералов возникла при высокотемпературном (выше 900°C) метаморфизме и метасоматозе глиноземистых сланцевых ксенолитов с появлением вторичного расплава. Нерасплавленный остаток и представляет собой наждак, состоящий из шпинели, магнетита, ильменита, силлиманита, корунда, сапфирина.

Наиболее крупные объемы сапфиринсодержащих пород на Урале выявлены на западном обрамлении Кемпирсайского гипербазитового массива [29]. Здесь широко распространена полосчатая толща габбро-амфиболитов с будинированными прослоями и линзами так называемых эденитовых лейкократовых эпиноритов и амфиболитов. Между всеми разновидностями амфиболитов и габбро-амфиболитов имеются постепенные переходы. Породообразующий светлый амфибол в них, диагностированный как эденит [29], по современной классификации является магнезиогорнблендом [48]. Именно в этих “эденитовых” породах отмечено значительное количество шпинели (плеонаста) и сапфирина. По представлениям авторов информации [29], габбро-амфиболиты образовались в процессе метаморфизма ультраосновных пород. Первично-магматическая природа габбро-амфиболитов Кемпирсайского массива подтвердилась и данными более позднего исследования [24]. Все авторы подчеркивают интенсивный метаморфизм первичных гипербазитов и габброидов, трансформировавшихся в полосчатый метагаббро-амфиболитовый комплекс.

Магнезиогорнблендовые (“эденитовые”) габбро-амфиболиты сложены преимущественно светло-зеленым амфиболом и подчиненным количеством зерен лабрадора. По описанию [29] все другие минералы встречаются здесь спорадически, лишь местами слагая скопления. Это выделения светло-голубого или бесцветного в шлифах сапфирина, зеленых кристаллов шпинели (плеонаста). Характерно присутствие друзитовых структур, проявленных в виде кайм вокруг зерен первичного амфибола (магнезиогорнбленда) с тончайшими симплектитовыми вростками сапфирина и шпинели. Кристаллы лабрадора нередко содержат игольчатые или каплевидные включения актинолита. В этих породах отмечено также присутствие в аксессуарных количествах хромовой шпинели (пикотита).

В совершенно иной геологической обстановке находятся сапфиринсодержащие породы в докембрийских гнейсо-амфиболитовых толщах Мугоджар [8]. Встречающиеся здесь линзовидные тела серпентинитов местами содержат мелкие линзы эклогитов и эклогитоподобных пород (участки Китар-

сай, Бугетысай, Тулепсай, Каратас, Орлиное гнездо и др.). В зоне эндоконтакта серпентинитов с вмещающими гнейсами наблюдаются оторочки шпинель-эденитовых и шпинель-энстатитовых пород, высокотемпературный метасоматоз которых привел к появлению в них сапфирина и корунда. Авторы публикации [8] усматривают аналогию условий образования корунд-сапфирино-шпинелевых пород Мугоджар и близких по геологической ситуации сапфириновых пород Западной Гренландии [65]. Более подробная информация о сапфириновых породах Мугоджар в цитированных работах отсутствует.

Маломощные линзы амфиболизированных гранатовых эклогитов Мугоджарского антиклинория также содержат в качестве акцессорных минералов муассонит, сапфирин, корунд и др. [1]. К сожалению, в работах [1, 8] сведения о составе сапфирина Мугоджар не приводятся. Отмечено наличие в сапфиринсодержащих породах симплектитовых структур, обрастание кристаллов корунда агрегатом мелких зерен сапфирина и шпинели.

Совсем недавно кристаллы сапфирина обнаружены Е.В. Пушкаревым (ИГиГ УрО РАН) в шлифах гранатовых вебстеритов из массива Южный Крак на западном склоне Урала (устное сообщение 2015 г. А.В. Рязанцева, ГИН РАН).

Наименее известными и изученными являются сапфириновые породы, изредка встречающиеся на локальных участках Ильмено-Вишневогорской зоны Южного Урала. Они и стали основным объектом нашего исследования.

САПФИРИНОВЫЕ ПОРОДЫ ТАЙГИНСКОГО УЧАСТКА ИЛЬМЕНО-ВИШНЕВОГОРСКОГО КОМПЛЕКСА ЮЖНОГО УРАЛА. ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ СИТУАЦИЯ

На Южном Урале, севернее оз. Увильды, к западу от пос. Тайгинка, в виде меридиональной полосы шириной 4.5–5.0 км обнажаются породы кыштымской толщи: гранат-биотитовые гнейсы, кристаллосланцы и амфиболиты. Среди них встречаются послойные, иногда секущие, жилы гранитных пегматитов, мелкие тела гранитов и монзонитоидов. В последнее время обнаружены доказательства [18], что эти породы, традиционно считавшиеся рифейскими, являются метаморфизованными позднепалеозойскими образованиями. Кыштымская толща с запада по разлому соприкасается с протерозойской селянкинской толщей гранат-силлиманитовых гнейсов, кварцитов, амфиболитов и плагиомигматитов, а с востока граничит с позднепалеозойским массивом гнейсовидных гранитов с кварцито-сланцевыми скиалитами (рис. 1).

Наиболее примечательной особенностью описываемого района является присутствие в кыштымской толще неравномерно рассредоточенных меридиональных линзовидных участков, сложен-

ных серпентинитами с включениями разновеликих блоков пироксен-амфиболовых анортитовых габбро, гранатовых и безгранатовых клинопироксенитов, оливинсодержащих ортопироксенитов, горнблендитов. Границы этих тел с окружающими породами тектонические. Их протяженность редко превышает 1 км, а мощность достигает нескольких сотен метров. По составу и строению эти образования вполне отвечают понятию серпентинитового меланжа. Его основную массу составляют хризотилловые волокна с реликтами первичных минералов: оливина, энстатита, хромшпинелидов. Выходы меланжа трассируют локальные тектонические разломы. Линзовидные фрагменты серпентинитового меланжа наблюдаются в виде ксенолитов и в гнейсовидных гранитах позднего палеозоя, чем и определяется верхняя возрастная граница протрузий меланжа. Серпентиниты и содержащиеся в них блоки мафитов и ультрамафитов пересекаются жильными телами гранитов и гранитных пегматитов, вокруг которых отмечаются лишь маломощные зоны хлоритизации, реже флогопитизации и амфиболизации. Подобные образования широко распространены по простиранию южнее оз. Увильды в пределах Ильменогорского метаморфического комплекса [14, 18]. Как в Ильменах, так и на Тайгинском участке серпентинитовый меланж не имеет пространственной и генетической связи с офиолитами, отличается от них набором мафитов и ультрамафитов. Офиолитовые образования в структуре Ильмено-Вишневогорского комплекса отсутствуют [17]. Серпентинитовый меланж здесь протрузивно выжимался во время тектонических импульсов, его образование не связано с присутствием пород офиолитовой триады.

Разрез одного из тел серпентинитового меланжа среди гнейсов кыштымской толщи обнажен в 3 км к юго-западу от пос. Тайгинка Челябинской области, северо-восточнее г. Карабаш, в пункте с координатами: 55°36'21.6" N; 60°27'43.3" E. В северной придорожной выемке высотой около 2 м на протяжении 20 м можно наблюдать выходы меланократовых средне- и крупнозернистых полнокристаллических массивных пород. В восточной части обнажения В.И. Петров обнаружил рассматриваемые далее шпинель-сапфириновые горнблендиты (рис. 2). Они были очень кратко и не совсем точно описаны в публикации [20]. В нескольких метрах южнее шурф вскрывает крупнозернистые плагиоклазиты с кристаллами серовато-голубого корунда.

Благодаря содействию С.В. Колисниченко нам удалось в 2013–2015 гг. посетить это обнажение и более детально изучить состав слагающих его пород. Основной объем обнажения занимают средне- и крупнозернистые оливинсодержащие амфиболовые ортопироксениты. Через промежутки в 2–5 м из них были последовательно отобраны образцы Сп-7–Сп-11 (см. рис. 2). На всем протяжении обна-

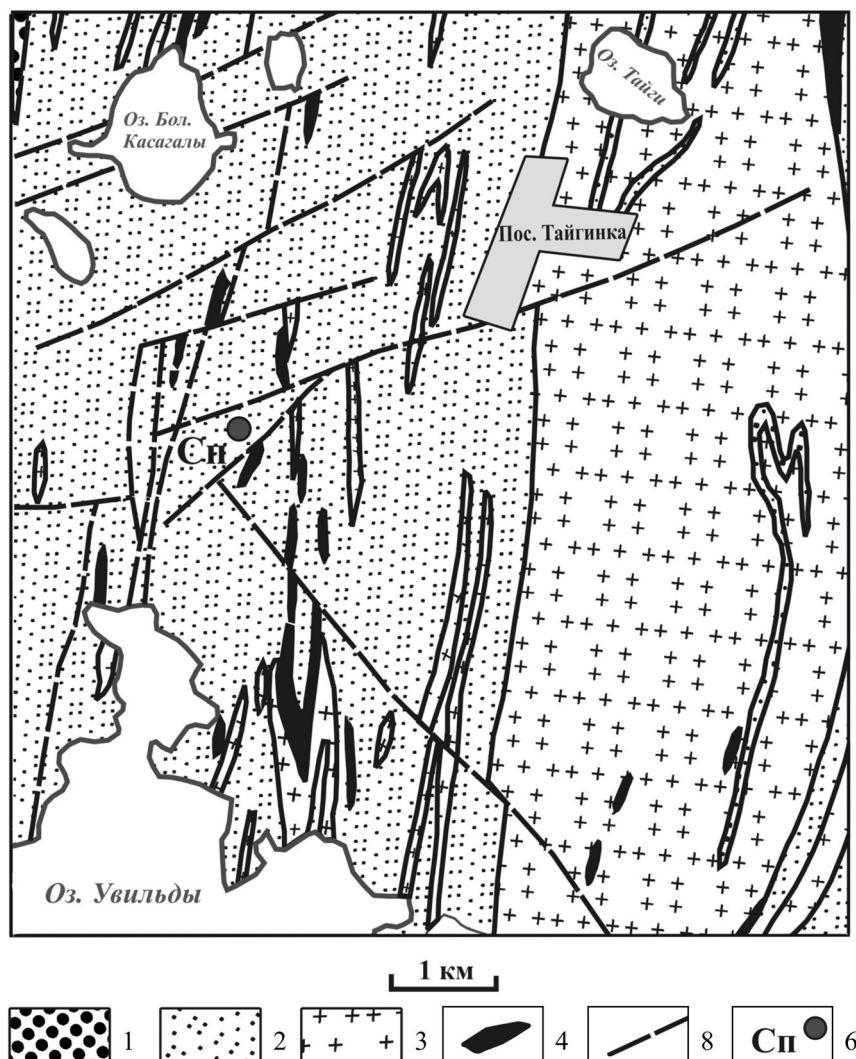


Рис. 1. Упрощенная геологическая схема Тайгинского участка Ильмено-Вишневогорского комплекса Южно-го Урала. Составлена на основе геологической карты масштаба 1 : 50 000 В.Н. Юрецкого, В.И. Петрова и др. 1982 г.

1 – протерозойская селянкинская толща силлиманит-гранатовых гнейсов с прослоями кварцитов, амфиболитов, плагиомигматитов, зонами бластомилонитов; 2 – палеозойские гранат-биотитовые гнейсы, кристаллосланцы, кварциты и амфиболиты кыштымской толщи с зонами бластомилонитов и жилами пегматитов; 3 – позднепалеозойские гнейсовидные граниты и монзонитоиды с жильными телами гранитных пегматитов; 4 – участки проявления серпентинитового меланжа с блоками габбро, клино- и ортопироксенитов, ультрабазитов; 5 – линии разрывных нарушений; 6 – местонахождение сапфиринсодержащих пород.

Fig. 1. Simplified geological scheme of Taiginka area of Ilmeno-Vishnevogorsk complex of the Southern Urals. Made by materials of geological map 1 : 50 000 scale (V.N. Yuretskii, V.I. Petrov et al., 1982).

1 – Proterozoic Selyankino formation of sillimanite-garnet gneisses with interlayers of quartzites, amphibolites, plagiomigmatites and zones of blastomylonites; 2 – Paleozoic garnet-biotite gneisses, crystalloshists, quartzites, and amphibolites of Kyshtym strata with zones of blastomylonites, and veins of pegmatites; 3 – Late-Paleozoic gneissoid granites and monzonitoides with veins of granitic pegmatites; 4 – areas of existence of serpentinite mélange with blocks of gabbro, clino- and orthopyroxenites, hyperbasites; 5 – line faults; 6 – locations of sapphirine-bearing rocks.

жения облик пород, их состав и структура остаются довольно постоянными. В наиболее свежих разновидностях короткопризматические зерна энстатита плотно прилегают друг к другу, размещены без определенной ориентировки и достигают 1 см в поперечнике (рис. 3г). В пределах образца на расстоя-

нии 10–12 см можно наблюдать отчетливое изменение размеров кристаллов энстатита, т. е. здесь проявлены элементы градиционной структуры породы. Во всех отобранных образцах составы энстатитов практически одинаковы (табл. 1, ан. 2, 7, 14, 20, 26), характеризуюсь низкой железистостью (0.07–0.10).

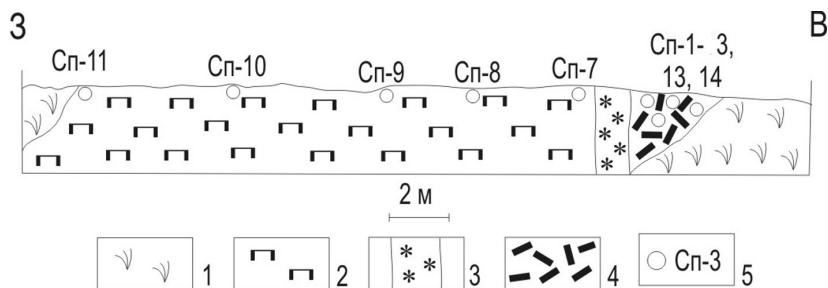


Рис. 2. Зарисовка стенки обнажения оливинсодержащих ортопироксенитов и шпинель-сапфириновых горнблендитов на Тайгинском участке (по В.Г. Кориневскому).

1 – делювиально-почвенный слой, 2 – амфиболовые оливинсодержащие ортопироксениты, 3 – жильное тело гигантозернистых ортопироксенитов, 4 – шпинель-сапфириновые горнблендиты, 5 – места отбора образцов пород и их номера.

Fig. 2. Sketch of wall outcrop of the olivine-bearing orthopyroxenites and spinel-sapphirine hornblendites in Taiginka area (by V.G. Korinevsky).

1 – deluvial-soil layer, 2 – amphibolic olivine-bearing orthopyroxenites, 3 – vein of giant-grained orthopyroxenites, 4 – spinel-sapphirine hornblendites, 5 – locations of rock samples and their numbers.

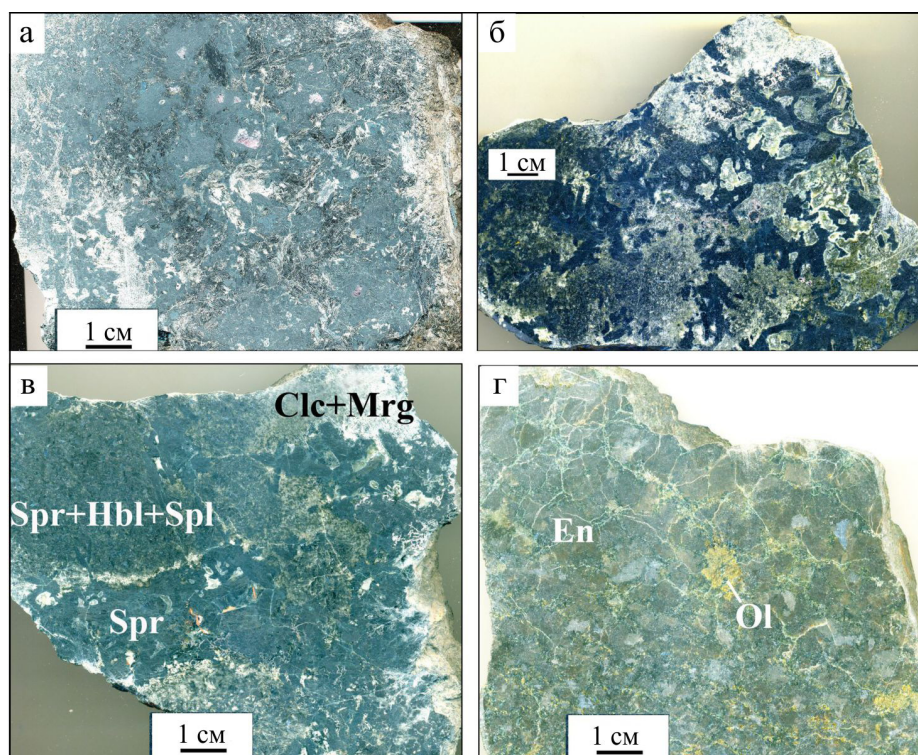


Рис. 3. Фото полированных образцов шпинель-сапфириновых горнблендитов (а, б, в) и оливиновых ортопироксенитов (г).

а – неравномерно среднезернистый шпинель-сапфириновый горнблендит (обр. Сп-1); б – миароловые пустоты в пегматоидном шпинель-сапфириновом горнблендите, выполненные агрегатом клинохлора, маргарита, мусковита, талька, корунда и гематита (обр. Сп-14); в – участки пегматоидной структуры в шпинель-сапфириновом горнблендите (обр. Сп-13); г – фрагмент градационной структуры в ортопироксените (обр. Сп-7). Обозначения минералов: *Clc* – клинохлор, *Mrg* – маргарит, *Spr* – сапфирин, *Hbl* – горнблендит, *Spl* – шпинель, *En* – энстатит, *Ol* – оливин.

Fig. 3. Photos of polished samples spinel-sapphirine hornblendites (a, б, в), and olivine orthopyroxenites (г).

а – unevenly medim-grained spinel-sapphirine hornblendite (sample Sp-1); б – miarolitic vughes in the pegmatoid spinel-sapphirine hornblendite completed the aggregate of clinocllore, margarite, muscovite, talc, corundum and hematite (sample Sp-14); в – areas of pegmatoid structure in the spinel-sapphirine hornblendite (sample Sp-13); г – fragment of graded structure in orthopyroxenite (sample Sp-7). Mineral symbols: *Clc* – clinocllore, *Mrg* – margarite, *Spr* – sapphirine, *Hbl* – hornblendite, *Spl* – spinel, *En* – enstatite, *Ol* – olivine

Таблица 1. Микрозондовые анализы минералов амфиболовых оливинсодержащих ортопироксенитов Тайгинского участка, мас. %**Table 1.** Electron microprobe analyses of minerals of amphibole olivine-bearing orthopyroxenites of Taiginka area, wt. %

№ п.п.	Номер пробы	Минерал	Компонент														
			SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	ZnO	NiO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма	f
1	СП-7	<i>Prg</i>	48.3	0.04	10.8	0.32	—	4.54	—	19.57	12.1	—	—	2.2	0.21	98.02	0.1
2		<i>En</i>	56.3	—	1.4	—	—	6.38	—	35.34	0.19	—	—	0.11	—	99.76	0.1
3		<i>Chr-Mag</i>	—	0.3	3.17	15.87	79.01	—	0.71	0.92	—	—	—	—	—	99.98	1
4	СП-8	<i>Clc</i>	31	—	18.39	0.15	—	3.59	—	34.16	—	—	—	—	—	87.31	0.1
5		<i>Mhb</i>	50.1	0.05	8.88	0.2	—	4.14	0.02	20.21	12.5	—	—	1.75	0.14	98	0.1
6		<i>Tr</i>	56.1	—	3.04	0.11	—	2.88	—	23.26	12	—	—	0.35	0.1	97.91	0.1
7		<i>En</i>	56.7	—	1.41	—	—	6.47	—	35.11	0.09	—	—	0.09	—	99.89	0.1
8		<i>Ol</i>	41.5	—	—	—	—	11.1	0.26	47	—	—	0.16	—	—	99.98	0.1
9		<i>Chr-Spl</i>	—	—	34.07	25.25	—	27.6	—	11.3	—	0.89	—	—	—	99.13	0.6
10		<i>Chr-Mag</i>	—	0.44	5	20.38	72.36	—	—	1.65	—	—	—	—	—	99.83	1
11	СП-9	<i>Clc</i>	30.9	—	19.06	0.69	—	3.67	—	33.06	—	—	—	—	—	87.34	0.1
12		<i>Tlc</i>	61.1	—	1.95	—	—	1.55	—	31.42	—	—	—	0.82	—	96.85	0
13		<i>Mhb</i>	53	0.03	6.49	0.16	—	3.78	—	21.13	12.4	—	—	1.09	0.12	98.25	0.1
14		<i>En</i>	56.8	0.04	0.78	—	—	6.89	—	34.72	0.39	—	—	—	—	99.65	0.1
15		<i>Chr-Spl</i>	0.36	—	42.31	20.9	—	22.7	—	13.03	—	—	—	—	—	99.29	0.5
16		<i>Chr-Mag</i>	—	0.39	4.71	25.82	66.15	—	0.14	2.6	—	—	—	—	—	99.81	0.9
17		<i>Clc</i>	29.6	—	19.94	0.25	—	3.47	—	34.15	—	—	—	—	—	87.37	0.1
18	СП-10	<i>Tlc</i>	61.4	—	0.53	—	—	2.09	—	32.74	—	—	—	—	—	96.75	0
19		<i>Mhb</i>	52.4	—	6.23	0.22	—	3.9	—	21.82	12.1	—	—	1.28	0.11	98.05	0.1
20		<i>En</i>	56.7	—	—	—	—	2.72	—	39.48	0.11	—	0.69	—	—	99.69	0.1
21		<i>Ol</i>	41.6	—	—	—	—	10.6	—	47.41	—	—	0.34	—	—	99.91	0.1
22		<i>Chr-Mag</i>	—	0.36	4.62	20.71	71.87	—	0.15	2.21	—	—	0.08	—	—	99.92	0.9
23		<i>Clc</i>	31.5	—	17.91	0.22	—	3.65	—	34.11	—	—	—	—	—	87.38	0.1
24		<i>Ni-Hem</i>	10.5	—	0.33	—	77.24	—	—	1.33	—	—	10.1	—	—	99.49	—
25	СП-11	<i>Mhb</i>	53	—	6.61	0.1	—	3.35	—	21.31	12.5	—	—	0.68	0.18	97.69	0.1
26		<i>En</i>	56.3	—	1.11	—	—	6.69	0.23	35.35	0.27	—	—	—	—	99.97	0.1
27		<i>Clc</i>	31.5	—	17.43	0.07	—	3.79	—	34.58	—	—	—	—	—	87.38	0.1

Примечание. Здесь и в остальных таблицах: Сп-7–Сп-11 – номера проб пород, из которых отобраны минералы; их привязка – см. рис. 2. Обозначения минералов [73]: *Prg* – паргасит, *Mhb* – магнезиогорнбленд, *Tr* – тремолит, *En* – энстатит, *Chr-Spl* – хромшпинель, *Chr-Mag* – хроммагнетит, *Clc* – клинохлор, *Tlc* – тальк, *Ol* – оливин, *Ni-Hem* – никелистый гематит. f – общая железистость (Fe/Fe + Mg). Прочерк – нет данных. Растровый электронный микроскоп РЭММА-202 М. Аналитик В.А. Котляров (ИМин УрО РАН).

Note. Here and in other tables: Sp-7–Sp-11 – the numbers of samples, which the minerals were selected from; their binding – see fig. 2. Symbols of minerals [73]: *Prg* – pargasite, *Mhb* – magnesiohornblende, *Tr* – tremolite, *En* – enstatite, *Chr-Spl* – spinel, *Chr-Mag* – chrommagnetite, *Clc* – clinocllore, *Tlc* – talc, *Ol* – olivine, *Ni-Hem* – Ni-hematite. f – total ferruginosity (Fe/Fe + Mg). Dash – not detected. Scanning electron microscope REMMA-202 M. Analyst V.A. Kotlyarov (Institute of Mineralogy UB RAS).

В большинстве изученных образцов пород преобладают призматические выделения темного буровато-зеленого амфибола длиной от 0.1 до 10 мм. В шлифах отчетливо видно, что мелкозернистый агрегат амфибола неравномерно развивается по энстатиту (рис. 4а, б) и в обычных случаях от энстатитовых кристаллов остаются лишь реликтовые участки в крупнозернистой амфиболовой массе (рис. 4в). По составу амфибол относится к магнезиогорнбленду (см. табл. 1, ан. 5, 13, 19, 25), в единичных случаях – к паргаситу (см. табл. 1, ан. 1). Иногда наблюдаются кристаллы тремолита (см. табл. 1, ан. 6). Во всех случаях амфиболам присущи низкая железистость (0.08–0.12) и резкое преобладание ионов Fe³⁺ над ионами Fe²⁺.

Достаточно редко в амфиболизированной матрице ортопироксенитов сохраняются реликтовые зерна

оливина (см. рис. 4г), лишь частично серпентинизированные вдоль трещин. Их размеры в длину иногда достигают 10 мм, по составу – это форстериты с железистостью 0.11 (см. табл. 1, ан. 8, 21). Примечательно, что и другие породообразующие минералы породы (энстатиты, амфиболы) имеют столь же низкую железистость (0.07–0.11). Выделения оливина в ортопироксенитах занимают объем менее 5%.

В промежутках между зернами амфибола, а также в виде небольших участков и прожилков сложной формы в пределах кристаллов энстатита нередко встречаются выделения клинохлора (см. табл. 1, ан. 4, 11, 17, 23, 27) и талька (см. табл. 1, ан. 12, 18). Эти вторичные минералы сохраняют низкую железистость (0.03–0.06), унаследованную от первичных минералов (энстатита, оливина), по которым они развиваются.

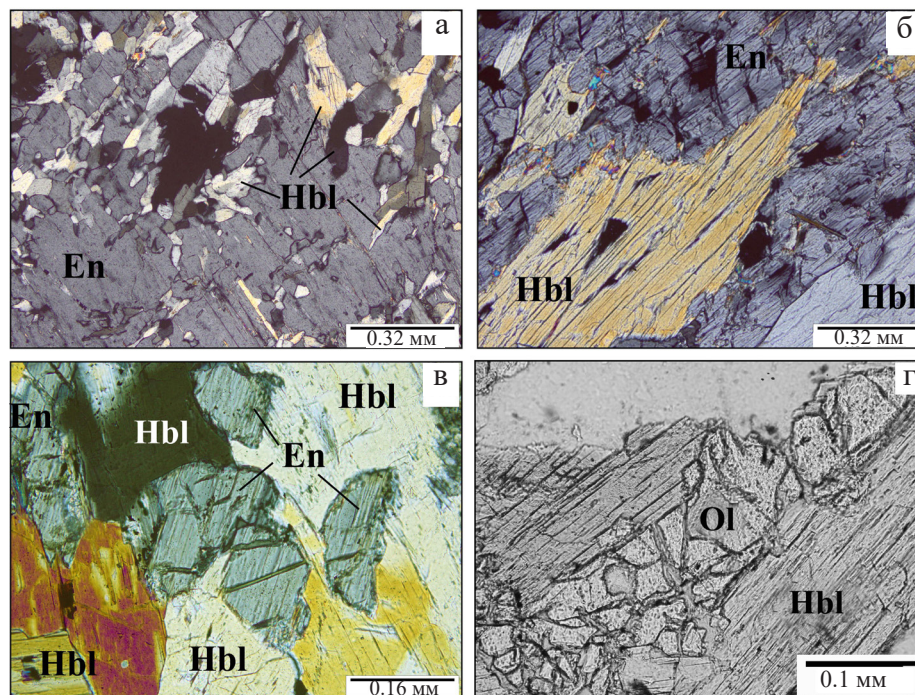


Рис. 4. Характер замещения крупных кристаллов энстатита амфиболом в ортопироксенитах Тайгинского участка. Фото шлифов.

а – мелкие зерна амфибола в разных направлениях пересекают крупные кристаллы энстатита; б – крупное зерно амфибола сложной формы с зазубренными границами замещает кристалл энстатита; в – мелкие реликтовые фрагменты зерна энстатита, замещенные амфиболом; г – реликтовое зерно оливины в амфиболизированном ортопироксените. Обозначения минералов: *Tlc* – тальк, *En* – энстатит, *Hbl* – горнбленд.

Fig. 4. The nature of replacement of large crystals of enstatite by amphibole in orthopyroxenites of Taiginka area. Photos of thin sections.

а – small grains of an amphibole in different directions cross large crystals of an enstatite; б – large grain of an amphibole with serrated borders replaces a crystal of an enstatite; в – small relict fragments of an enstatite grain replaced by an amphibole; г – a relict grain of olivine in the amphibolized matrix of orthopyroxenite. Mineral symbols: *En* – enstatite, *Hbl* – hornblende.

Характерным для оливинсодержащих ортопироксенитов является неравномерно распределенная мелкая вкрапленность хромшпинелидов и хроммагнетитов (рис. 5). Их размеры редко превышает 100 мкм. Очертания их выделений угловатые, границы с окружающими минералами резкие, извилистые. Хромшпинели (см. табл. 1, ан. 9, 15) обладают высокой железистостью (0.49–0.58), содержат около 21–25 мас. % Cr_2O_3 . Хроммагнетит развивается по периферии зерен хромшпинели (см. рис. 5в), замещая последнюю. Для хроммагнетита (см. табл. 1, ан. 3, 10, 16, 22) характерны низкое содержание Al_2O_3 (около 5 мас. %), большое количество Cr_2O_3 (16–26 мас. %), значительная железистость (0.93–0.98). Очевидно, к вторичным минералам, замещающим хромшпинель, следует отнести и выделения никелистого гематита (см. табл. 1, ан. 24). Редкая вкрапленность других рудных минералов представлена мелкими зернами пентландита, пирротина и никелистого магнетита (см. рис. 5г).

Таким образом, минеральный состав оливинсодержащих амфиболовых ортопироксенитов ма-

ло отличается от такового подобных пород дунит-габбро-пироксенитовой формации Урала [7]. Существуют представления [13, 21], что аналогичные ортопироксениты могут быть продуктом прогрессивного метаморфизма первичных серпентинитов. Хризотилловый состав серпентинитовой матрицы меланжа, резкие границы расположенных в ней блоков и глыб ультрамафитов, вторичный характер амфибола в них, индукционные поверхности синхронного роста энстатита, оливины и хромшпинелидов, наличие градиционной структуры, присутствие гломеропорфировых сростков крупных индивидов энстатита – все это противоречит высказанным предположениям и заставляет отнести описанные ортопироксениты Тайгинки к породам магматическим.

Вдоль границы ортопироксенитов и шпинель-сапфириновых пород располагается тело гигантозернистых энстатититов вертикального залегания мощностью 1.2 м (см. рис. 2). Оно сложено расщепленными кристаллами энстатита светло-бурого цвета. Призматические индивиды энстатита дли-

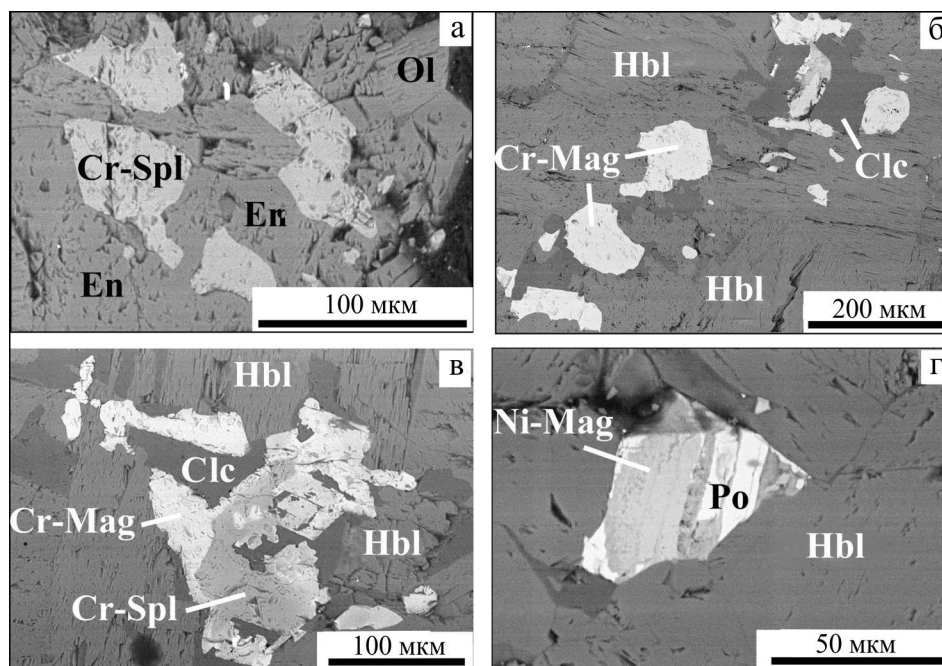


Рис. 5. Акцессорные минералы в амфиболовых оливинсодержащих ортопироксенитах. Фото в отраженных электронах на сканирующем микроскопе РЭММА-202 М.

а – зерна хромшпинели (*Cr-Spl*) (обр. Сп-7); б – зерна хроммагнетита (*Cr-Mg*) (обр. Сп-9); в – кайма хроммагнетита вокруг зерна хромшпинели (обр. Сп-8); г – сросток никелистого магнетита (*Ni-Mag*) и пирротина (*Po*) (обр. Сп-10).

Fig. 5. Accessory minerals in the amphibole olivine-bearing orthopyroxenites. Photos in the reflected electrons on the scanning microscope REMMA-202 M.

а – grains of a chromspinel (*Cr-Spl*) (sample Sp-7); б – grains of a chrommagnetite (*Cr-Mg*) (sample Sp-9); в – rim of a chrommagnetite around grain of a chromspinel (sample Sp-8); г – intergrowth of a Ni-magnetite (*Ni-Mag*) with a pyrrhotite (*Po*) (sample Sp-10).

ною до 10–15 см нередко образуют радиально-лучистые сростки. Такое строение имеют многие жильные тел энстатитов среди массивов ультраосновных пород Урала и рассматриваются как пегматитовые образования [10]. Резкие прямолинейные контакты рассматриваемых здесь энстатитов с окружающими породами свидетельствуют о жильной природе этих образований.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Полнокристаллическое сложение сапфириновых пород Тайгинского участка позволило применить традиционные методы петрографии: просмотр и фотографирование шлифов и аншлифов в проходящем и отраженном свете на микроскопе фирмы Olympus. Химический состав пород определялся в Институте минералогии УрО РАН классическими способами “мокрой химии” по методике 163-X. Комплекс минералогических исследований включал в себя изучение полированных препаратов на сканирующих электронных микроскопах, получение дифрактограмм, инфракрасных, мессбауэровских и рамановских спектров. Ручной отбор зерен минералов из протолок пород произ-

водили под бинокулярным микроскопом. Чистота проб близка к 100%. Кристаллохимические формулы минералов рассчитывали с помощью электронной программы PetroExplorer, подсчет количества минералов в шлифах – по программе JMicroVision [60]. Индексы минералов на фотографиях и в таблицах приведены в соответствии с рекомендациями [73]. Оценку *P-T* параметров формирования пород осуществляли на современных минеральных геотермобарометрах [39, 45, 58, 62, 63].

Химический состав минералов определял В.А. Котляров на растровом электронном микроскопе РЭММА-202 с энергодисперсионной приставкой LZ-5 Link Systems с Si-Li детектором при ускоряющем напряжении 20–30 кВ и диаметре пучка 1–2 мкм. Коррекцию данных производили с помощью программы Magallanes. В качестве стандартов применяли эталоны с шашки MINM 25–53 и природные минералы. Часть анализов (рутила, шриланкита, алланита) получена И.А. Блиновым на сканирующем электронном микроскопе Vega 3 Tescan с энергодисперсионным детектором Oxford Instruments X-act.

Мессбауэровское исследование сапфирина выполнено А.Б. Мироновым на спектрометре CM-2201 с источником излучения Co^{57} в матрице Rh в режиме

постоянных ускорений в геометрии пропускания при комнатной температуре. Эффективная толщина образцов составляла 10 мг/см² Fe в естественной смеси изотопов, что соответствует приближению тонкого поглотителя. Компьютерное разложение мессбауэровского спектра сапфирина на компоненты проведено с помощью программы Univem-2. Алгоритм моделирования мессбауэровского спектра сапфирина состоял в первоначальном выделении двух дублетов от ионов Fe²⁺ и Fe³⁺ с последовательным добавлением новых дублетов с усредненным значением изомерного сдвига до достижения минимального значения хи-квадрат.

Инфракрасный спектр пропускания сапфирина из пробы СП-3 получен М.В. Штенбергом с помощью ИК Фурье спектрометра Nicolet 6700 Thermo Scientific по стандартной методике (таблетирование с KBr). Разрешение спектра 4 см⁻¹. Для спектра выполнены процедуры коррекции базовой линии и пересчет в оптическую плотность. Обработку производили с помощью программного комплекса OMNIC Thermo Scientific.

Рамановские спектры сапфирина регистрировали в спектральном диапазоне 100–2000 см⁻¹ с помощью лазерного КР спектрометра IHR 320 LabRAM фирмы Jobin Yvon, снабженного микроскопом Olympus BX41, TV камерой и охлаждаемым CCD детектором. Для идентификации спектров сапфирина использовали базу данных [61]. Рентгеноструктурное исследование сапфирина выполнено Т.М. Рябухиной (Институт минералогии УрО РАН) на дифрактометре ДРОН-2.0 с графитовым монохроматором и внутренним кварцевым эталоном, с Cu-анодом, шагом 0.02°/мин.

Содержания редких и рассеянных элементов в породах определены М.С. Свиренко и К.А. Филипповой в ИМин УрО РАН. Кислотное вскрытие проб горных пород выполнялось в микроволновой системе разложения SpeedWave (Berghoff, Германия) в автоклавах из фторопласта при двухступенчатом нагреве до температур 180°C в течение 40 мин смесью кислот HF, HCl и HNO₃. Для метрологического контроля качества анализа использовали международный стандарт базальта BCR-2. Калибровку прибора осуществляли с помощью стандартных мультиэлементных растворов фирмы Agilent и ГСО для всей шкалы масс анализируемых элементов. Анализ подготовленных растворов выполнен методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на приборе Agilent 7700x (Япония).

ПЕТРОГРАФИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ САПФИРИНОВЫХ ПОРОД

Собственно сапфириновые породы упомянутого разреза (см. рис. 2) Тайгинского участка обнаружены непосредственно восточнее жильного тела гигантозернистых энстатитов на протяжении

3 м. Далее к востоку они перекрыты делювиально-почвенным слоем. Судя по геологической карте (см рис. 1), за ним располагаются выходы гнейсов кыштымской толщи. В пределах этого небольшого участка отобрано 5 образцов сапфиринсодержащих пород (СП-1, 2, 3, 13, 14). Преобладающими здесь являются темно-серые полнокристаллические сапфирин-шпинель-роговообманковые массивные породы неравномерно-зернистой структуры плотностью 3.16 г/см³ (см. рис. 3а, образцы СП-1, 2, 3). Обычно размеры кристаллических индивидов в них не превышают 5 мм. В большинстве случаев заметно преобладает амфибол (до 70 об. %), участками содержания сапфирина достигают 45%, а шпинели – до 50%. На акцессорные и второстепенные минералы в сумме приходится 2–4% объема породы. Полосчатости и ориентированного расположения зерен в породе не отмечено. К числу второстепенных минералов относятся ильменит, корунд, рутил, хёбломит. Несмотря на тщательные поиски, не обнаружено ни одного зерна оливина или энстатита, о которых упоминалось в заметке [20]. В акцессорных количествах и в виде единичных зерен присутствуют титаномагнетит, магнетит, циркон, фторпатит, анортит, жедрит, монацит, алланит, ильменорутит, шеелит, уранинит, торит, ксенотим, вольфрамит, шриланкит. Участками в породе развиваются вторичные минералы: клинохлор, кальцит, тальк, маргарит, гематит, мусковит и альбит. Всего в результате микрозондовых исследований в горнблендитах Тайгинского участка установлено присутствие 30 минералов. Большинство аксессуаров приурочено к заполнению межзерновых промежутков вторичными минералами, к участкам прежних миароловых пустот.

В ряде образцов сапфиринсодержащих пород (СП-13, 14) отчетливо проявлены грубозернистая пегматоидная структура и пятнистая, миндалевидная текстура (см. рис. 3б, в). Границы пегматоидных участков с окружающей среднезернистой шпинель-сапфирин-роговообманковой породой резкие, извилистые. В этих участках кристаллы сапфирина и амфибола достигают 2–3 см в длину. Промежутки между ними заполнены светлым беловато-серым мелкозернистым агрегатом клинохлора, мусковита, маргарита, корунда, альбита, чешуйками талька, пластинками гематита. Эти осветленные участки породы имеют разлапистые очертания, которые подчеркиваются зональным распределением тех или иных минералов. По строению и набору минералов они соответствуют гидротермальному заполнению миароловых пустот в пегматитах. Важно подчеркнуть, что составы минералов из образцов среднезернистых сапфиринсодержащих пород (СП-1, 2, 3) и из пегматоидных участков (СП-13, 14) практически не различаются (табл. 2–6).

Макроскопически черные призматические кристаллы амфибола слагают основной объем горн-

Таблица 2. Микронзондовые анализы амфиболов из шпинель-сапфириновых горнблендитов Тайгинского участка, мас. %
Table 2. Electron microprobe analyses of amphiboles from the spinel-sapphirine hornblendites of Taiginka area, wt. %

№ пробы	Сп-1		Сп-2				Сп-3		Сп-13		Сп-14
Минерал	<i>Prg</i>	<i>Mhb</i>	<i>Ts</i>	<i>Prg</i>	<i>Ged</i>	<i>Prg</i>	<i>Ts</i>	<i>Prg</i>	<i>Sdg</i>	<i>Mhb</i>	<i>Ts</i>
Компонент	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SiO ₂	44.36	44.62	43.35	42.42	41.83	43.67	43.67	44.50	43.52	44.01	43.80
TiO ₂	0.81	0.87	1.75	1.96	1.58	0.86	1.00	0.99	0.88	0.74	0.66
Al ₂ O ₃	15.33	15.40	15.74	16.25	20.41	15.73	16.06	15.30	16.42	16.33	16.52
FeO	6.06	6.23	6.59	6.51	8.33	6.23	6.42	5.93	6.47	6.33	6.69
MnO	0.13	0.02	—	—	0.13	—	—	—	—	—	—
MgO	17.71	17.15	16.58	16.21	22.28	17.78	17.12	17.46	16.42	16.35	16.50
CaO	11.78	11.64	11.54	11.73	0.67	11.68	11.68	11.81	11.77	11.41	12.05
Na ₂ O	2.10	1.91	2.19	2.58	2.84	2.27	1.77	2.17	2.41	2.01	1.74
K ₂ O	0.30	0.49	0.23	0.23	0.01	0.31	0.33	0.33	0.26	0.34	0.34
Сумма	98.58	98.33	97.97	97.89	98.08	98.53	98.05	98.49	98.15	97.52	98.30
Формульные коэффициенты (на 46 зарядов)											
Si	6.164	6.217	6.082	6.015	5.739	6.081	6.097	6.192	6.094	6.196	6.105
Ti	0.085	0.091	0.185	0.209	0.163	0.090	0.105	0.104	0.093	0.078	0.069
Al ^{IV}	1.836	1.783	1.918	1.985	2.261	1.919	1.903	1.808	1.906	1.804	1.895
Al ^{VI}	0.675	0.746	0.685	0.731	1.039	0.662	0.740	0.701	0.804	0.905	0.818
Fe ³⁺	0.568	0.520	0.534	0.242	0.480	0.588	0.603	0.500	0.521	0.371	0.617
Fe ²⁺	0.136	0.207	0.239	0.530	0.475	0.138	0.146	0.190	0.237	0.374	0.163
Mn	0.015	0.002	—	—	0.015	—	—	—	—	—	—
Mg	3.669	3.562	3.468	3.427	4.557	3.660	3.551	3.622	3.428	3.431	3.428
Ca	1.754	1.738	1.735	1.782	0.098	1.743	1.747	1.761	1.766	1.721	1.799
Na	0.566	0.516	0.596	0.709	0.755	0.613	0.479	0.585	0.654	0.549	0.470
K	0.053	0.087	0.041	0.042	0.002	0.055	0.059	0.059	0.046	0.061	0.060
f	0.16	0.17	0.18	0.18	0.17	0.17	0.17	0.16	0.18	0.18	0.19
Fe ³⁺ /Fe ²⁺	4.18	2.51	2.23	0.46	1.01	4.26	4.13	2.63	2.19	0.99	3.78

Примечание. 1–11 – анализы отдельных зерен; 3–5 – округлые включения в кристаллах рутила, остальные – породообразующие амфиболы. *Prg* – паргасит, *Ts* – чермакит, *Mhb* – магнезиогорнблен, *Ged* – жедрит, *Sdg* – саданагаит; f – общая железистость (Fe/Fe + Mg). Растровый электронный микроскоп РЭММА-202 М. Аналитик В.А. Котляров (ИМин УрО РАН). Формульные коэффициенты амфиболов рассчитаны на базе номенклатуры [48] по методу [52].

Note. 1–11 – analyses of individual grains; 3–5 – rounded inclusions in crystals rutile, the rest are the rock-forming amphiboles. *Prg* – pargasite, *Ts* – chermacite, *Mhb* – magnesiohornblende, *Ged* – gedrite, *Sdg* – sadanagaite; f – total ferruginosity (Fe/Fe + Mg). Scanning electron microscope REMMA-202 M. Analyst V.A. Kotlyarov (Institute of Mineralogy UB RAS). Formula coefficients of amphiboles calculated on the basis of the nomenclature [48] according to the method [52].

Таблица 3. Микронзондовые анализы сапфиринов из шпинель-сапфириновых горнблендитов Тайгинского участка, мас. %
Table 3. Electron microprobe analyses of sapphirines from spinel-sapphirine hornblendites of Taiginka area, wt. %

№ пробы	Сп-1		Сп-2		Сп-3		Сп-13		Сп-14	
Компонент	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO ₂	11.61	12.58	11.56	11.50	10.88	11.05	14.09	12.68	12.65	13.16
Al ₂ O ₃	66.00	63.75	66.03	65.77	66.77	66.60	60.61	62.57	62.90	62.49
Cr ₂ O ₃	—	—	0.16	—	0.16	0.05	—	—	—	—
FeO	4.52	5.12	4.64	4.70	4.28	4.26	5.31	4.91	4.76	4.42
MgO	17.42	18.47	17.43	17.88	17.69	17.61	20.17	19.10	19.35	19.53
Сумма	99.55	99.92	99.82	99.85	99.78	99.57	100.23	99.26	99.66	99.60
Формульные коэффициенты (на 20 атомов кислорода)										
Si	1.364	1.473	1.356	1.346	1.273	1.296	1.643	1.492	1.481	1.540
Al	9.141	8.801	9.127	9.074	9.208	9.204	8.329	8.676	8.678	8.620
Cr	—	—	0.015	—	0.015	0.005	0.005	—	—	—
Fe ³⁺	0.131	0.252	0.147	0.234	0.231	0.200	0.381	0.341	0.361	0.300
Fe ²⁺	0.313	0.249	0.309	0.226	0.188	0.218	0.137	0.142	0.105	0.133
Mg	3.051	3.225	3.047	3.120	3.085	3.078	3.506	3.349	3.376	3.407
f	0.13	0.13	0.13	0.13	0.12	0.12	0.13	0.13	0.12	0.11
Fe ³⁺ /Fe ²⁺	0.42	1.01	0.48	1.04	1.23	0.92	2.78	2.40	3.44	2.26

Примечание. 1–10 – анализы разных зерен. TiO₂, MnO – не обнаружены, содержания Fe₂O₃ определены методом [41]; f – общая железистость. Растровый электронный микроскоп РЭММА-202 М. Аналитик В.А. Котляров (ИМин УрО РАН).

Note. 1–10 – analyses of different grains. TiO₂ and MnO were not detected, Fe₂O₃ determined by method [41]; f – total ferruginosity. Scanning electron microscope of REMMA-202 M. Analyst V.A. Kotlyarov (Institute of Mineralogy UB RAS).

Таблица 4. Микронзондовые анализы шпинелидов из шпинель-сапфириновых горнблендитов Тайгинского участка, мас. %**Table 4.** Electron microprobe analyses of spinelides from the spinel-sapphirine hornblendites of Taiginka area, wt. %

№ пробы	Сп-1	Сп-2		Сп-3		Сп-13		
Минерал	Spl							Chr-Spl
Компонент	1	2	3	4	5	6	7	8
TiO ₂	—	—	—	—	—	—	—	—
Al ₂ O ₃	65.21	64.61	64.56	67.62	67.67	65.79	67.29	50.19
Cr ₂ O ₃	0.22	0.53	0.50	0.20	0.09	—	—	12.26
FeO	19.06	22.62	21.71	13.38	14.18	15.34	13.37	28.59
MnO	0.13	0.14	0.26	—	—	—	—	0.30
MgO	14.60	11.66	12.19	18.56	17.83	18.68	19.18	8.31
Сумма	99.22	99.56	99.22	99.76	99.77	99.81	99.84	99.65
Формульные коэффициенты (на 4 атома кислорода)								
Ti	—	—	—	—	—	—	—	—
Al	2.005	2.014	2.012	2.010	2.017	1.976	1.999	1.692
Cr	0.004	0.011	0.010	0.004	0.002	—	—	0.277
Fe ³⁺	—	—	—	—	—	0.032	0.003	0.037
Fe ²⁺	0.416	0.500	0.480	0.282	0.300	0.295	0.279	0.647
Mn	0.003	0.003	0.006	—	—	—	—	0.007
Mg	0.567	0.459	0.480	0.697	0.672	0.709	0.720	0.354
f	0.42	0.52	0.50	0.29	0.31	0.32	0.28	0.66

Примечание. 1–7 – анализы отдельных зерен шпинели (*Spl*), 8 – хромшпинели (*Chr-Spl*). SiO₂, ZnO, SnO – не обнаружены. Количество Fe³⁺ определено по методу [41]. Растровый электронный микроскоп РЭММА-202 М. Аналитик В.А. Котляров (ИМин УрО РАН).

Note. 1–7 – analyses of individual grains of a spinel (*Spl*), 8 – chromspinel (*Chr-Spl*). SiO₂, ZnO, SnO is not found, Fe³⁺ was determined by [41]. Scanning electron microscope of REMMA-202 M. Analyst V.A. Kotlyarov (Institute of Mineralogy UB RAS).

Таблица 5. Микронзондовые анализы магнезиохёгбомита из шпинель-сапфириновых горнблендитов Тайгинского участка, мас. %**Table 5.** Electron microprobe analyses of magnesiohögbohmite from spinel-sapphirine hornblendites of Taiginka area, wt. %

№ пробы	Сп-2		Сп-14							
Компонент	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TiO ₂	7.04	6.20	6.38	6.05	6.10	5.98	6.30	6.91	6.50	6.77
Al ₂ O ₃	62.71	64.26	63.79	64.58	62.90	63.01	62.68	63.84	64.74	63.67
Cr ₂ O ₃	0.25	0.18	0.11	0.10	0.13	0.05	—	—	0.11	0.09
FeO	14.04	13.69	15.14	14.25	17.88	19.13	17.86	14.79	14.26	15.89
MgO	15.60	13.91	12.75	12.97	11.01	9.03	11.13	14.30	14.26	13.51
Сумма	99.64	98.24	98.17	97.95	98.02	97.20	97.97	99.84	99.87	99.93
Формульные коэффициенты (на 28 катионов)										
Ti	1.296	1.158	1.202	1.137	1.166	1.163	1.204	1.275	1.196	1.254
Al	18.093	18.815	18.843	19.032	18.840	19.209	18.782	18.463	18.668	18.493
Cr	0.048	0.035	0.022	0.020	0.026	0.010	—	—	0.021	0.017
Fe ²⁺	2.874	2.843	3.172	2.979	3.799	4.137	3.797	3.034	2.917	3.274
Mg	5.690	5.148	4.761	4.832	4.169	3.480	4.216	5.228	5.198	4.961
f	0.34	0.36	0.40	0.38	0.48	0.54	0.47	0.37	0.36	0.49

Примечание. 1–10 – анализы отдельных зерен. SiO₂, MnO, ZnO, SnO не обнаружены. Растровый электронный микроскоп РЭММА-202 М. Аналитик В.А.Котляров (ИМин УрО РАН).

Note. 1–10 – analyses of individual grains. SiO₂, MnO, ZnO, SnO is not found. Scanning electron microscope of REMMA-202 M. Analyst V.A. Kotlyarov (Institute of Mineralogy UB RAS).

блендитов. Их размеры по измерениям в шлифах колеблются от 0.01–0.25 до 1.0–1.2 мм, а в образцах породы встречаются зерна длиной 10–30 мм. Минерал отличается заметным плеохроизмом от светлого бурого по N_p до темного буро-зеленого по N_g. С кристаллами сапфирина и шпинели амфибол контактирует по резким, нередко извилистым, границам без

следов реакционных взаимоотношений. Участками кристаллы амфибола содержат включения зерен шпинели и сапфирина без следов коррозии последних. Иногда встречаются включения очень мелких кристаллов циркона, монацита, рутила, тончайшие пластинчатые вроски торита. Химический состав большинства зерен амфибола (см. табл. 2) соответ-

Таблица 6. Микронзондовые анализы титановых минералов из шпинель-сапфириновых горнблендитов Тайгинского участка, мас. %

Table 6. Electron microprobe analyses of titanium minerals from the spinel-sapphirine hornblendites of Taiginka area, wt. %

Компонент	1	2	3	4	5
SiO ₂	—	—	—	—	1.12
TiO ₂	96.09	65.17	79.65	51.84	48.85
Al ₂ O ₃	—	—	—	—	—
Cr ₂ O ₃	—	—	0.58	—	—
Sc ₂ O ₃	—	1.65	—	—	—
Y ₂ O ₃	—	1.36	—	—	—
Ce ₂ O ₃	—	1.33	—	—	—
FeO	1.31	23.67	5.93	44.65	1.61
MnO	—	0.10	—	1.19	—
MgO	—	—	—	2.29	—
CaO	—	2.16	—	—	—
SrO	—	1.44	—	—	—
ZrO ₂	—	—	—	—	36.66
HfO ₂	—	—	—	—	1.60
UO ₂	—	—	—	—	5.77
ThO ₂	—	—	—	—	—
Ta ₂ O ₅	—	—	—	—	—
Nb ₂ O ₅	1.29	—	14.25	—	3.81
V ₂ O ₅	—	3.01	—	—	—
WO ₃	0.75	—	—	—	—
Сумма	99.44	99.89	100.41	99.97	99.42

Примечание. 1 – наиболее распространенная разновидность рутила, 2 – редкометалльная железистая разновидность рутила, 3 – ильменорутит, 4 – ильменит, 5 – шриланкит из включений в рутиле. ThO₂, Ta₂O₅ не обнаружены. Растровый электронный микроскоп РЭММА-202 М. Аналитик В.А. Котляров (ИМин УрО РАН).

Note. 1 – the most common a variety of a rutile, 2 – rare-metal and ferruginosity variety of a rutile, 3 – ilmenorutile, 4 – ilmenite, 5 – srilankite from inclusions in a rutile, ThO₂, Ta₂O₅ is not detected. Scanning electron microscope of REMMA-202 M. Analyst V.A. Kotlyarov (Institute of Mineralogy UB RAS).

ствует паргаситу, часть – чермакиту, магнезиогорнблендиту и саданагаиту [48], с высокой степенью окисленности Fe. Заметного различия в химическом составе центральных и краевых частей зерен амфибола не наблюдается.

Темные голубовато-серые кристаллы сапфирина распределены в горнблендитах весьма неравномерно: его содержания меняются от 2 до 45% объема породы. Их размеры колеблются в пределах 0.25–30.00 мм. Отмечен слабый плеохроизм сапфирина: от почти бесцветного по N_p до светло-голубого по N_g. Границы зерен сапфирина с другими минералами неровные, резкие, следов замещения не наблюдалось (рис. 6а, б, в). Включения в кристаллах сапфирина немногочисленны. Обычно это зерна шпинели

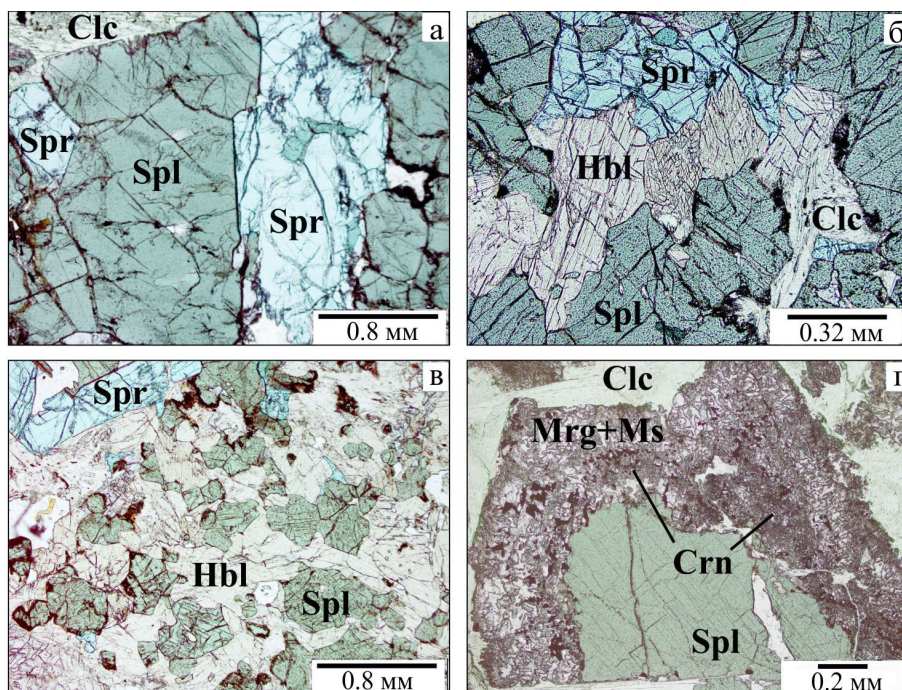


Рис. 6. Фотографии шлифов шпинель-сапфириновых горнблендитов Тайгинского участка.

а – резкие извилистые границы зерен шпинели и сапфирина без следов замещения друг другом; б, в – изометричные зерна шпинели среди призматически-зернистой массы из кристаллов амфибола и сапфирина; г – последовательные реакционные каемки корунда (Crn) маргарита (Mrg) и мусковита (Ms) вокруг зерен шпинели на границе со скоплениями клинохлора (Clc).

Fig. 6. Photos of thin sections of the spinel-sapphirine hornblendites of Taiginka area.

а – sharp winding boundaries of the grains of a spinel and a sapphirine without traces of substitution of each other; б, в – isometric spinel grains among the prismatic-granular mass of crystals of an amphibole and a sapphirine; г – consistent reaction rims of corundum (Crn), margarite (Mrg) and muscovite (Ms) around the spinel grains at the border with clusters of a clinochlore (Clc).

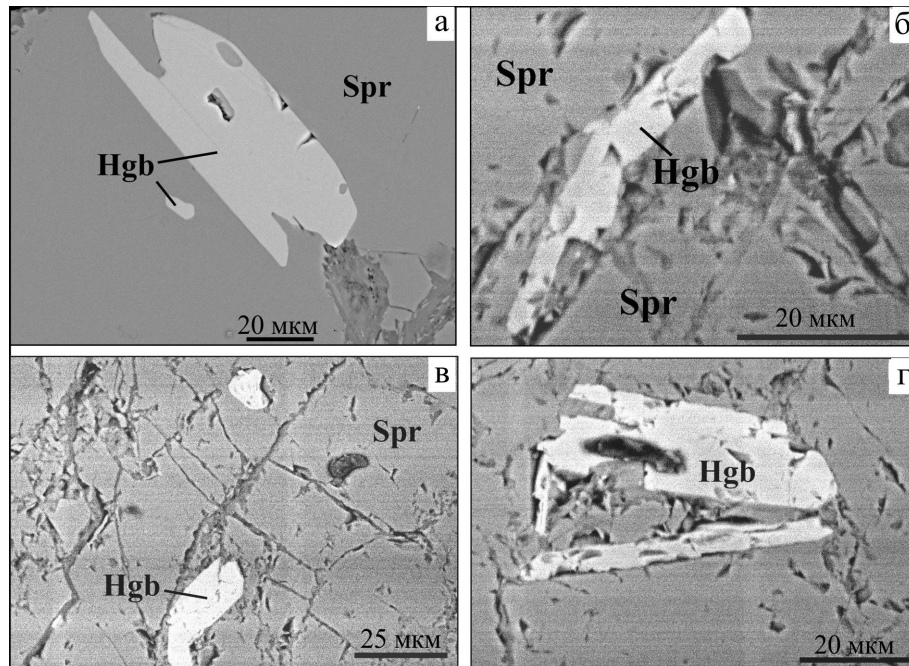


Рис. 7. Морфология включений магнезиохёгбомита в кристаллах сапфирина. Фото в отраженных электронах на сканирующем микроскопе РЭММА-202 М.

а – образец Сп-2, б–г – образец Сп-14. Резкие извилистые границы индукционных поверхностей одновременного роста магнезиохёгбомита (*Hgb*) и сапфирина (*Spr*). Пластинчатая и субизометричная форма кристаллов магнезиохёгбомита.

Fig. 7. Morphology of inclusions of magnesiohögbohmite (*Hgb*) in crystals sapphirine(*Spr*). Photos in the reflected electrons on the scanning microscope REMMA-202 M.

а – sample Sp-2; б–г – sample Sp-14. Sharp winding boundaries of induction surfaces of simultaneous growth of magnesiohögbohmite (*Hgb*) and sapphirine (*Spr*). Plate and subisometric form crystals of a magnesiohögbohmite.

нели, амфибола, хёгбомита (рис. 7) и рутила, иногда ильменита. Химический состав сапфирина относительно постоянен (см. табл. 3), в заметных количествах рассеянных элементов не зафиксировано. Дифрактограмма сапфирина (табл. 7) практически не отличается от таковой у типовых образцов [46]. Сапфирин относится к моноклинному типу 2М с параметрами элементарной ячейки: $a = 1.298 \text{ \AA}$, $b = 14.448 \text{ \AA}$, $c = 9.958 \text{ \AA}$, $\beta = 125.510^\circ$, $V = 1322.898 \text{ \AA}^3$.

Мессбауэровские спектры сапфирина Тайгинки (рис. 8а, табл. 8) близки к ранее полученным [36] для голубовато-зеленого сапфирина из Лаккертоппена (Гренландия). Ионы Fe^{3+} в тетраэдрической координации занимают примерно треть от общего числа позиций железа (32.46%), а ионы Fe^{2+} входят в два октаэдра с разной степенью искажения полиэдра (а) и (б), предпочитая менее искаженную позицию (а) (47.11%) более искаженной (б) (20.43%).

В инфракрасном спектре сапфирина полосы в области $400\text{--}1200 \text{ см}^{-1}$ связаны с деформационными и валентными колебаниями связей Si–O и Al–O в кристаллической решетке (рис. 8б). По данным [38] в сапфирине при увеличении содержания кремния уменьшается разрешение полос и проис-

ходит небольшое смещение в низкочастотную область. Сравнение спектра образца СП-3 со спектрами, представленными в работе [38], показало, что он близок к спектру с содержанием кремния от 1.27 до 1.41 Si на 20 атомов кислорода.

Сопоставление КР-спектров со спектрами из базы данных RRUFF.info [61] показало, что положения КР-полос, зарегистрированные в разных точках исследуемого образца, соответствуют эталонному сапфиру R060073 (рис. 8в). В спектре наблюдаются интенсивная широкая полоса с максимумом при 166 см^{-1} , которую можно отнести к решёточным колебаниям, и интенсивные полосы в области $570, 680$ и 910 см^{-1} , которые относятся к деформационным и валентным колебаниям связи Si–O соответственно, а также слабые полосы в области 220 и 370 см^{-1} .

Таким образом, все физические свойства и химический состав описываемого сапфирина Урала подобны таковым для его эталонных образцов из других местонахождений в мире [61]. Как указано ранее, составы сапфирина из образцов разных структурных разновидностей горнблендитов различаются мало.

Изометричные зерна травяно-зеленой в шлифах шпинели неравномерно размещены в при-

Таблица 7. Расшифровка порошковой дифрактограммы сапфирина из Тайгинского участка (проба Сп-2)**Table 7.** Decoding powder diffraction pattern of sapphire from Taiginka area (sample Sp-2)

№	2 Θ , °	d, Å	I, %	hkl
1	19.277	4.604	7	2 0 0
2	20.816	4.267	7	1 3 0
3	21.903	4.058	2	1 2 -2
4	24.67	3.609	7	0 4 0
5	26.641	3.346	35	2 3 -2
6	27.204	3.278	8	3 2 -2
7	28.701	3.110	9	0 3 2
8	29.774	3.001	57	3 1 0
9	31.33	2.855	32	1 2 2
10	31.499	2.84	52	2 4 0
11	32.296	2.772	21	4 1 -2
12	33.126	2.704	5	0 0 3
13	33.746	2.656	5	4 1 -3
14	34.393	2.607	3	4 1 -1
15	34.804	2.578	29	3 4 -2
16	35.479	2.530	5	0 2 3
17	36.598	2.455	100	2 5 -2
18	36.847	2.439	8	2 0 -4
19	37.532	2.396	4	2 1 2
20	38.226	2.354	42	1 4 2
21	38.613	2.332	7	0 5 2
22	42.374	2.133	15	2 6 0
23	43.61	2.075	1	5 1 -4
24	44.647	2.030	40	0 0 4
25	44.896	2.019	84	4 5 -2
26	46.466	1.954	3	4 5 -1
27	47.887	1.900	16	1 6 2
28	50.056	1.822	7	5 1 0
29	58.377	1.581	7	0 2 5
30	59.569	1.552	3	2 0 4
31	59.89	1.544	6	6 5 -2
32	60.316	1.534	4	6 0 0
33	64.536	1.444	25	0 10 0
34	64.757	1.440	68	4 5 -6
35	64.971	1.435	36	4 8 -4
36	65.59	1.423	51	4 5 2
37	66.176	1.412	15	0 5 5
38	66.373	1.408	11	8 0 -4

Примечание. Анализ выполнен Т.М. Рябухиной (ИМин УрО РАН) на дифрактометре ДРОН-2.0 с графитовым монохроматором и внутренним эталоном (кремний), с Cu-анодом, шагом 0.02°/мин.

Note. The analysis is performed by T.M. Ryabukhina (Institute of Mineralogy UB RAS) on the diffractometer DRON-2.0 with graphite monochromator and an internal standard (silicon), with Cu-anode, a step of 0.02°/min.

матически-зернистой массе кристаллов амфибола (см. рис. 6в). Размеры выделений шпинели колеблются в пределах 0.01–3.20 мм. Их границы с кристаллами сапфирина и амфибола повсеместно резкие, без следов реакционных взаимоотношений (см. рис. 6б, в). Лишь в местах соприкосновения с пластинчатым агрегатом клинохлора вдоль

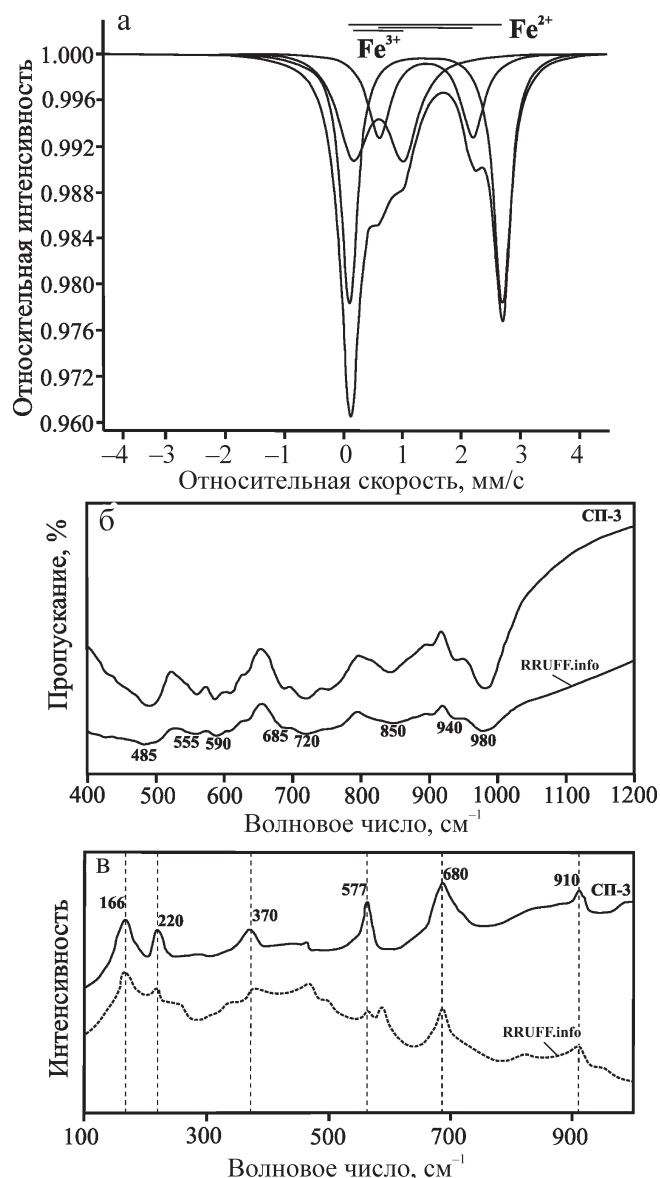


Рис. 8. Спектральные характеристики сапфирина из шпинель-сапфириновых горнблендитов Тайгинского участка (обр. Сп-3).

а – мессбауэровский спектр, б – инфракрасный спектр пропускания, в – рамановский спектр. Для сравнения представлены спектры эталонных образцов. Исследования проведены в Институте минералогии УрО РАН М.В. Штенбергом, А.Б. Мироновым, С.М. Лебедевой.

Fig. 8. Spectral characteristics of sapphire from the spinel-sapphire hornblende of Taiginka area (sample Sp-3).

а – Mössbauer spectrum, б – infrared transmittance spectrum, в – Raman spectrum. For comparison spectra of reference samples are given. Investigations were performed at the Institute of Mineralogy of UB of RAS by M.V. Stenberg, A.B. Mironov, and S.M. Lebedeva.

периферии зерен шпинели появляется темная тонкозернистая каемка гематита или последовательно

Таблица 8. Параметры мессбауэровского спектра сапфирина из шпинель-сапфириновых горнблендитов Тайгинского участка (проба СП-2)

Table 8. The parameters of Mössbauer spectrum of sapphire from the spinel-sapphirine hornblendites of Taiginka area (sample Sp-2)

Ион Fe	IS	Qs	HW	S
Fe ²⁺ (oct, a)	1.41	2.60	0.35	47.11
Fe ²⁺ (oct, b)	1.42	4.59	0.45	20.43
Fe ³⁺ (tetr)	0.61	0.85	0.62	32.46

Примечание. IS – изомерный сдвиг относительно нитропруссиды натрия, мм/с; QS – квадрупольное расширение, мм/с; HW – полуширина линии, мм/с; S – площадь дублета в спектре, %. Спектрометр СМ-2201. Аналитик А.Б. Миронов (ИМин УрО РАН).

Note. IS – isomer shift relative to sodium nitroprusside, mm/s; QS – quadrupole expansion, mm/s; HW – half-width of line, mm/s; S – area of the doublet in the spectrum, %. Spectrometer SM-2201. Analyst A.B. Mironov (Institute of Mineralogy UB RAS).

сменяющиеся реакционные каемки из мелких выделений корунда, маргарита, мусковита, альбита (см. рис. 6г). Посторонних включений в кристаллах шпинели, как правило, не наблюдалось, за исключением редких выделений кальцита и корунда. Химический состав шпинелевых зерен довольно однороден (см. табл. 4) и отвечает составу плеонаста, не содержащего Zn. Повсеместно присутствует небольшое количество Cr₂O₃. Иногда отмечается редкая вкрапленность хромшпинели (см. табл. 4, ан. 8).

По составу к плеонасту близки зерна хёгбомита, наблюдаемые в виде включений в кристаллах сапфирина. Обычно они имеют таблитчатую (см. рис. 7а, б, г), реже изометричную (см. рис. 7в) форму с закругленными контурами. По химическому составу большинство зерен хёгбомита относится к магнезиальной разновидности (см. табл. 5). В свете современной номенклатуры [34] и по имеющимся рентгеноструктурным данным хёгбомит

Таблица 9. Микронзондовые анализы второстепенных и аксессуарных минералов из шпинель-сапфириновых горнблендитов Тайгинского участка, мас. %

Table 9. Electron microprobe analyses of minor and accessory minerals from the spinel-sapphirine hornblendites of Taiginka area, wt. %

№ п. п.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Минерал	<i>Ab</i>	<i>Aln</i>	<i>An</i>	<i>Cal</i>	<i>Ccl</i>	<i>Crn</i>	<i>Hem</i>	<i>Mnz</i>	<i>Mrg</i>	<i>Ms</i>	<i>Sch</i>	<i>Ti-Mag</i>	<i>Tur</i>	<i>Zrn</i>
SiO ₂	66.51	36.62	45.25	—	27.09	—	—	1.62	32.97	46.17	—	—	40.94	—
TiO ₂	—	—	—	—	—	—	2.13	—	—	—	2.02	14.40	—	—
Al ₂ O ₃	19.78	23.11	35.61	—	23.10	98.37	0.45	—	43.54	37.71	—	—	41.58	—
Cr ₂ O ₃	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
FeO	0.55	5.09	0.11	0.41	413.38	0.90	85.86	0.74	2.63	0.46	0.97	77.24	1.19	—
MnO	—	—	—	0.32	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
MgO	0.36	3.41	0.03	0.68	24.17	—	0.11	—	5.68	1.28	—	0.53	2.65	—
CaO	1.54	14.90	17.70	54.67	—	—	—	5.95	7.49	0.20	20.03	—	0.93	—
BaO	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.75	—
NiO	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.01	—
Na ₂ O	10.57	—	0.93	—	—	—	—	—	2.46	0.32	—	—	0.16	—
K ₂ O	0.06	—	0.08	—	—	—	—	—	0.38	10.35	—	—	0.55	—
P ₂ O ₅	—	—	—	—	—	—	—	28.10	—	—	—	—	—	—
La ₂ O ₃	—	3.16	—	—	—	—	—	19.22	—	—	—	—	—	—
Ce ₂ O ₃	—	6.92	—	—	—	—	—	32.12	—	—	—	—	—	—
Pr ₂ O ₃	—	—	—	—	—	—	—	3.44	—	—	—	—	—	—
Nd ₂ O ₃	—	2.64	—	—	—	—	—	6.92	—	—	—	—	—	—
Sm ₂ O ₃	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ZrO ₂	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	63.79
ThO ₂	—	2.19	—	—	—	—	—	1.49	—	—	—	—	—	—
HfO ₂	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3.56
SO ₃	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
V ₂ O ₅	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
WO ₃	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	75.32	—	—	—
MoO ₃	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.65	—	—	—
Сумма	99.38	98.03	99.76	56.08	87.68	99.27	88.64	99.60	95.15	96.49	99.99	92.17	89.76	99.76

Примечание. Обозначения минералов: *Ab* – альбит, *Aln* – алланит (ортит), *An* – анортит, *Cal* – кальцит, *Ccl* – клинохлор, *Crn* – корунд, *Hem* – гематит, *Mnz* – монацит, *Mrg* – маргарит, *Ms* – мусковит, *Ti-Mag* – титаномagnetит, *Tur* – турмалин, *Sch* – шеелит, *Zrn* – циркон. Растровый электронный микроскоп РЭММА-202 М. Аналитики В.А. Котляров, И.А. Блинов (ИМин УрО РАН).

Note. Symbols of minerals: *Ab* – albite, *Aln* – allanite, *An* – anorthite, *Cal* – calcite, *Ccl* – clinochlore, *Crn* – corundum, *Hem* – hematite, *Mnz* – monazite, *Mrg* – margarite, *Ms* – muscovite, *Ti-Mag* – titanomagnetite, *Tur* – tourmaline, *Sch* – scheelite, *Zrn* – zircon. Scanning electron microscope REMMA-202 M. Analysts: V.A. Kotlyarov, I.A. Blinov (Institute of Mineralogy UB RAS).

из шпинель-сапфириновых горнблендитов Тайгинского участка является политипом магнезиохёгбомита – $2N3S$ [54]. Никаких следов реакционных взаимоотношений хёгбомита и сапфирина не отмечено. Гораздо реже мелкие изометричные зерна хёгбомита наблюдаются в виде включений в кристаллах шпинели или амфибола.

Кристаллы ильменита содержат примесь Mn и Mg (см. табл. 6, ан. 4). Нередко ильменит образует тонкие сростания с рутилом, титаномагнетитом, шриланкитом, монацитом, уранинитом, корундом. В зернах ильменита участками встречаются неориентированные пластинчатые выделения гематита.

В амфиболе и сапфирине встречаются мелкие изометричные включения циркона с повышенными содержаниями HfO_2 (табл. 9, ан. 14) и торийсодержащего монацита (см. табл. 9, ан. 8). Кристаллики фторапатита и алланита наблюдаются очень редко.

Кристаллы темно-красного рутила достигают размера около 1 мм. Отмечено присутствие пластинчатых сростков рутила с ильменитом. Состав рутиловых зерен изменчив. В отдельных зернах необычным оказалось присутствие редкометаллических элементов (Nb, W). В большинстве такие кристаллы рутила содержат довольно многочисленные мелкие (до 100 мкм) разрозненные включения разнообразных минералов. Это – ксенотим, торит, монацит, уранинит (рис. 9а), шеелит, вольфрамит, ильменит, ильменорутил, шпинель (плеонаст), корунд, амфибол, магнетит. Привлекают внимание округлые включения амфибола (до 20 мкм) в рутиле. По составу это преимущественно парга-

сит или чермакит (см. табл. 2, ан. 3, 4), аналогичные породообразующим амфиболам в описываемых горнблендитах. Кроме того, найдены включения амфиболов, которые выделяются (см. табл. 2, ан. 5) необычно высокими содержаниями Al_2O_3 , MgO (≥ 22.0 мас. %), Na_2O (2.8–3.1 мас. %), крайне низкими количествами CaO (< 1.0 мас. %). По новой классификации [48] эти амфиболы близки к жедриту, но относятся к новой разновидности (Rootname 2), обогащенной Al_2O_3 и MgO .

Особый интерес представляет обнаружение весьма редкого минерала шриланкита. Он был встречен лишь в 10 из 300 изученных зерен рутила. Размеры выделений шриланкита во всех случаях не превышают 20 мкм. Уральские шриланкиты выделяются высокими содержаниями U, Hf, Nb (см. табл. 6, ан. 5), но их составы достаточно хорошо соответствуют типовой кристаллохимической формуле. Несмотря на очень малые размеры выделений шриланкита, в них иногда наблюдается химическая зональность, подчеркнутая разным содержанием UO_2 . Присутствие в южноуральских рутилах вольфрама отличает их от рутилов, содержащих включения шриланкита из других их местонахождений. Включения титаномагнетита, ильменита, ильменорутила, вольфрамит, шеелита, гематита, монацита значительно более редки.

Необычным является присутствие в сапфириновой породе сильно железистой (FeO до 25 мас. %) разновидности рутила (см. табл. 6, ан. 2), содержащей и заметные количества Sc_2O_3 , Y_2O_3 , Ce_2O_3 , CaO , V_2O_5 . В курсе минералогии А.Г. Бетехтина их раньше

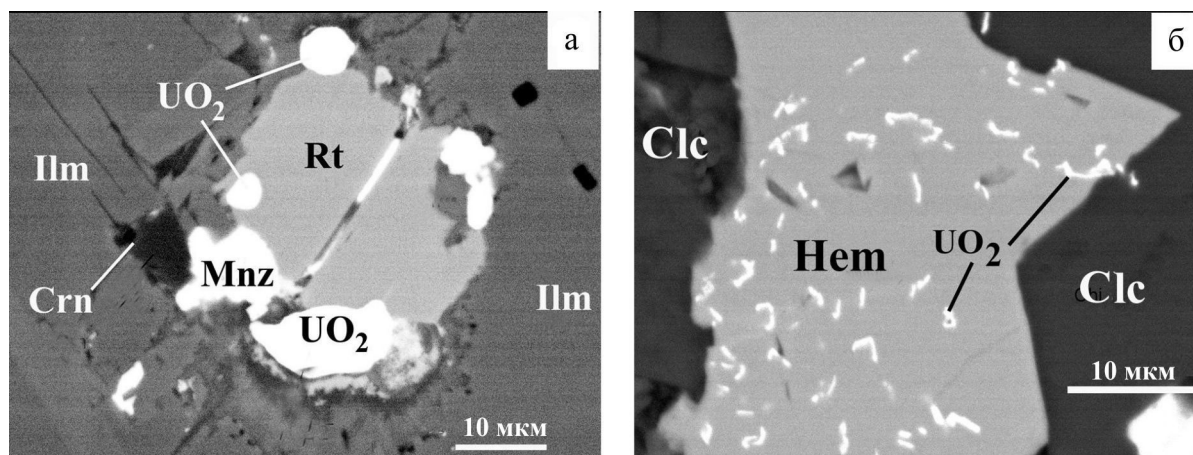


Рис. 9. Мельчайшие выделения уранинита среди минералов шпинель-сапфириновых горнблендитов Тайгинского участка. Фото шлифов.

а – выделения уранинита (UO_2) и монацита (Mnz), тяготеющие к кристаллам рутила (Rt) на границах с ильменитом (Ilm); б – уранинит образует незакономерные вроски в гематите (Hem) в скоплениях вторичного клинохлора (Clc).

Fig. 9. The smallest particles of uraninite (UO_2) among the minerals of spinel-sapphirine hornblende rocks of Taiginka area. Photos of thin sections.

а – the allocation of an uraninite and a monazite (Mnz) adjacent to a rutile crystals (Rt) at boundaries with a ilmenite (Ilm); б – irregular uraninite intergrowths in the hematite (Hem) in the secondary clusters clinocllore (Clc).

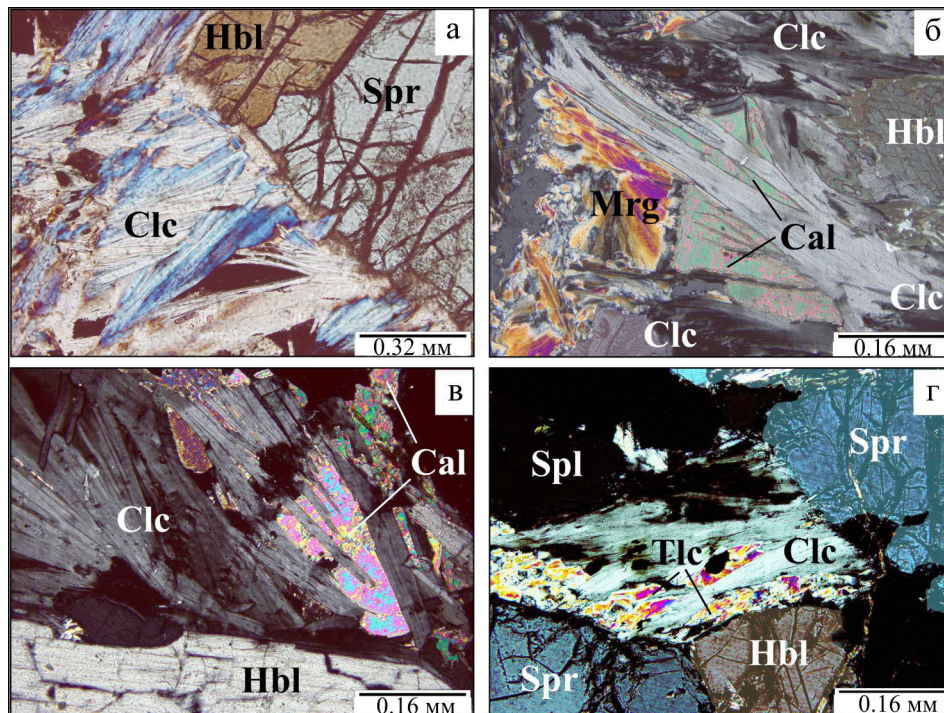


Рис. 10. Минеральное заполнение пустот (миарол) в пегматоидных участках шпинель-сапфириновых горнблендитов Тайгинского участка (образцы Сп-13, 14).

а – геометрический отбор в агрегате кристаллов клинохлора, нарастающих на стенки полости; б – агрегат минералов (клинохлора, кальцита (*Cal*) и маргарита (*Mrg*)), заполняющих промежутки в пегматоидных участках породы; в – синхронно растущие из пустот кристаллы клинохлора и кальцита; г – тальк-клинохлоровое (*Tlc*, *Clc*) заполнение промежутков между кристаллами амфибола, сапфирина и шпинели. Фото шлифов с анализатором.

Fig. 10. Mineral filling of miarolitic vughes in the pegmatoid spinel-sapphirine hornblendites of Taiginka area (samples Sp-13, 14).

а – geometric selection in the aggregate of the clinoclase crystals growing on the walls of the cavity; б – aggregate minerals (clinoclase, calcite (*Cal*) and margarite(*Mrg*)), filling up the gaps in the areas of rocks with pegmatoid structure; в – simultaneously growing crystals of a clinoclase and calcite from the cavities; г – talc-clinoclase (*Tlc*, *Clc*) filling the spaces between the crystals of a amphibole, spinel and sapphirine. Photos of thin sections with the analyser.

выделяли под названием нигрин. Встречены и выделения типичного ильменорутила (см. табл. 6, ан. 3).

Реликтовыми выглядят в горнблендитах Тайгинки зерна анортита (см. табл. 9, ан. 3), по периферии последовательно замещенные андезином, а затем альбитом (см. табл. 9, ан. 1). К вторичным минералам можно отнести и светло-сиреневый корунд, содержащий примесь FeO (см. табл. 9, ан. 6), который входит в состав реакционной каймы вокруг зерен шпинели (см. рис. 6г) и слагает тонкие прожилки в амфиболе. Такую же природу имеют отдельные скопления в миароловых пустотах пегматоидных горнблендитов маргарита (см. табл. 9, ан. 9), мусковита, кальцита, талька, клинохлора, рутила и турмалина (см. табл. 9, ан. 13) в промежутках между кристаллами шпинели, сапфирина и амфибола (рис. 10). В шлифах можно наблюдать, что кристаллы клинохлора совместно с чешуйками талька нарастают на стенки пустот, образуя структуры геометрического отбора, когда рост кристаллов осу-

ществляется к центру пустот, сменяясь там мелкозернистым агрегатом маргарита. На границе скоплений клинохлора и шпинели вокруг последней повсеместно наблюдается темная кайма, сложенная пластинчатым гематитом, которая отсутствует на границе клинохлора с зернами амфибола и сапфирина. Примечательно появление в гематите тонких симплектитовых вростков уранинита (рис. 9б).

Приведенное описание минерального состава шпинель-сапфириновых пород Тайгинского участка показывает их принципиальное отличие от состава соприкасающихся с ними преобладающих здесь амфиболовых оливинсодержащих ортопироксенитов. Это отражается не только в присутствии различающихся видов амфиболов, но и в наборе второстепенных и аксессуарных минералов, в отсутствии переходных разновидностей пород с реликтовыми участками протолита. Это исключает возможность предположения, что сапфиринсодержащие амфиболовые породы возникли за счет

инфильтрационно-метасоматического преобразования исходных ортопироксенитов. Если бы этот процесс действительно имел место, должны были образоваться метакристаллы и псевдоморфозы [26], которые в породе не наблюдаются.

Таким образом, горнблендиты Тайгинского участка характеризуются наличием в виде главных минералов синхронно образовавшихся паргасита, сапфирина, плеонаста и хёгбомита, не несущих признаков реакционных взаимоотношений. Неравномернозернистая полнокристаллическая структура горнблендитов, их массивная неориентированная текстура, отсутствие “теней” предшествующих минеральных ассоциаций, синхронное образование всех породообразующих минералов (амфибола, сапфирина, шпинели, хёгбомита), наличие первичных кристаллических включений разнообразных минералов, незначительное развитие вторичных преобразований породы заставляют признать сапфирин-шпинелевый горнблендит Тайгинского участка породой магматической. В ней присутствуют участки пегматоидной структуры, которые можно трактовать как продукты поздней (гидротермальной) стадии кристаллизации магматического расплава. В этот этап пустоты в породе заполняются агрегатом более поздних минералов, редких для такого типа ультраосновных пород: маргарита, турмалина, торита, уранинита, алланита, монацита, гематита и рутила с включениями амфиболов, шрилангита, ксенотима, ториянита, шеелита, вольфрамит, ильменита, ильменорутила, шпинели (плеонаста), корунда, кварца, магнетита. Крупнозернистые пегматоидные структуры, как и миароловые, вообще характерны для горнблендитов из ультрамафитовых массивов Урала, которые считаются [28] своеобразными пегматитами ультраосновных пород.

Примечательно, что блок сапфирин-шпинелевого горнблендита обнаружен в полосе серпентинитового меланжа, содержащего более распространенные разобщенные глыбы анортитовых горнблендитов, пироксен-амфиболовых анортитовых габбро, гранатовых и титаномagnetитовых клинопироксенитов с хёгбомитом и шпинелью, шпинелевых ортопироксенитов и других мафитов и ультрамафитов [19]. Как и описанные сапфирин-шпинелевые горнблендиты, они отличаются чрезвычайно хорошей сохранностью первичных магматических структур, наличием индукционных поверхностей синхронного роста у всех породообразующих минералов, весьма слабым проявлением вторичных преобразований, резкими контактами с вмещающими их серпентинитами. Все это служит дополнительным доказательством первично-магматической природы сапфирин-шпинелевого горнблендита Тайгинского участка. Представляется важным факт, что в базе данных [<http://database.iem.ac.ru/sapphirine>], суммирующей сведения о сапфиринсодержащих породах метаморфического или метасоматического проис-

хождения, не нашлось ни одного образца, в котором бы присутствовала реально наблюдаемая в нашем случае минеральная ассоциация ($Spr + Hbl + Spl + Ilm + Hgb + Rt$). Очевидно, следует признать, что сапфириновые горнблендиты Тайгинского участка имеют иное происхождение (магматическое).

ОСНОВНЫЕ ЧЕРТЫ ПЕТРОХИМИИ И ГЕОХИМИИ САПФИРИН-ШПИНЕЛЕВЫХ ГОРНБЛЕНДИТОВ УРАЛА

Описываемые сапфирин-шпинелевые горнблендиты отличаются аномально низкими содержаниями кремнезема, повышенными содержаниями глинозема и пониженной щелочностью (табл. 10), что не позволяет применять для их петрохимической классификации стандартное отношение кремнезема к сумме щелочей. Линии трендов распределения РЗЭ характеризуются пологим отрицательным наклоном (отношение

Таблица 10. Химический состав сапфиринсодержащих пород Урала, мас. %

Table 10. Chemical composition of sapphirine-bearing rocks of the Urals, wt. %

Проба	Тайгинский участок			Кемпирсайский массив	
	Сп-1	Сп-2	Сп-3	117-6	140-1
SiO ₂	27.84	22.63	21.20	41.74	39.58
TiO ₂	0.63	0.47	0.71	—	—
Al ₂ O ₃	38.14	44.65	44.64	19.28	26.10
Fe ₂ O ₃	5.07	4.89	7.04	1.16	2.90
FeO	2.78	2.51	2.80	3.12	2.70
MnO	0.06	0.06	0.06	—	—
MgO	15.48	16.25	15.43	17.94	12.14
CaO	5.20	3.58	4.20	10.42	14.94
Na ₂ O	1.27	0.78	0.88	1.53	—
K ₂ O	0.24	0.19	0.16	0.23	—
P ₂ O ₅	0.13	0.14	0.17	—	—
H ₂ O ⁻	—	0.22	0.10	0.57	0.20
H ₂ O ⁺	2.52	3.01	1.77	3.99	3.80
CO ₂	—	0.15	0.35	0.10	—
Сумма	99.36	99.53	99.51	100.08	98.76
Fe ³⁺ /Fe ²⁺	1.64	1.75	2.26	0.17	0.48

Примечание. Пробы Сп-1, 2, 3 – шпинель-сапфириновые горнблендиты с магнезиохёгбомитом, ильменитом и рутилом; анализы проб В.Г. Кориневского выполнены методами “мокрой” химии аналитиками М.Н. Маляренко, М.С. Свиренко в ИМин УрО РАН; пробы 117-6, 140-1 – сапфириновые магнезиогорнблендовые (“эденитовые”) габбро-амфиболиты; анализы методами “мокрой” химии выполнены в лабораториях ГИН АН СССР и ВИМС [29].

Note. Samples Sp-1, 2, 3 – spinel-sapphirine hornblendites with magnesiohögbohmite, ilmenite and rutile; analyses of V.G. Korinevsky's samples made with methods of wet chemistry by analysts M.N. Malyarenok, M.S. Svirenkо (Institute of Mineralogy UB RAS); sample 117-6, 140-1 – sapphirine magnesiohornblende (“edenite”) gabbro-amphibolites, analyses made by methods of wet chemistry in laboratories of GIN AN SSSR and VIMS [29].

Таблица 11. Содержания редких и рассеянных элементов в шпинель-сапфириновых горнблендитах Тайгинского участка Ильмено-Вишневогорской зоны Южного Урала, ppm

Table 11. Content of rare and trace elements in the spinel-sapphirine hornblendites of Taiginka area of the Ilmeno-Vishnevogorsky zone of the South Urals, ppm

Элемент	Сп-1	Сп-2	Сп-3	Элемент	Сп-1	Сп-2	Сп-3
Li	47.90	71.40	48.60	Pr	9.65	8.82	9.34
Be	1.94	1.67	1.86	Nd	44.10	40.20	40.30
Sc	42.90	46.10	36.20	Sm	12.40	11.20	11.20
V	213.00	194.00	182.00	Eu	8.39	8.25	6.99
Cr	167.00	211.00	235.00	Gd	12.10	11.30	10.90
Co	14.10	14.20	15.40	Tb	1.82	1.73	1.40
Ni	86.50	86.10	76.50	Dy	11.30	11.60	8.23
Cu	18.00	37.90	12.10	Ho	2.09	2.24	1.39
Zn	44.60	59.20	27.50	Er	5.55	6.39	3.45
Ge	4.88	4.38	4.08	Tm	0.81	0.96	0.45
Rb	9.28	11.00	5.33	Yb	5.45	6.66	3.10
Sr	196.00	202.00	168.00	Lu	0.84	1.02	0.47
Y	60.00	66.50	39.40	Hf	3.34	2.39	2.64
Zr	117.00	85.80	93.80	Ta	3.47	0.41	0.19
Nb	0.60	0.63	0.50	W	1.81	4.00	1.33
Mo	4.70	5.40	12.60	Pb	1.86	1.47	0.79
Cd	0.27	0.21	0.22	Bi	0.68	0.96	0.52
Sn	2.39	2.54	1.69	Th	11.40	6.47	15.30
Ba	49.50	53.20	29.40	U	2.38	6.92	4.19
La	24.20	22.20	30.90	Co/Ni	0.16	0.16	0.20
Ce	64.70	57.80	71.40	Sr/Ba	3.96	3.80	5.71

Примечание. Содержания элементов определены методом ICP-MS. Аналитики К.А. Филиппова, М.С. Свиренко (ИМин УрО РАН).

Note. The content of the elements determined by ICP-MS method. Analysts A.K. Filippova, M.S. Svirenko (Institute of Mineralogy UB RAS).

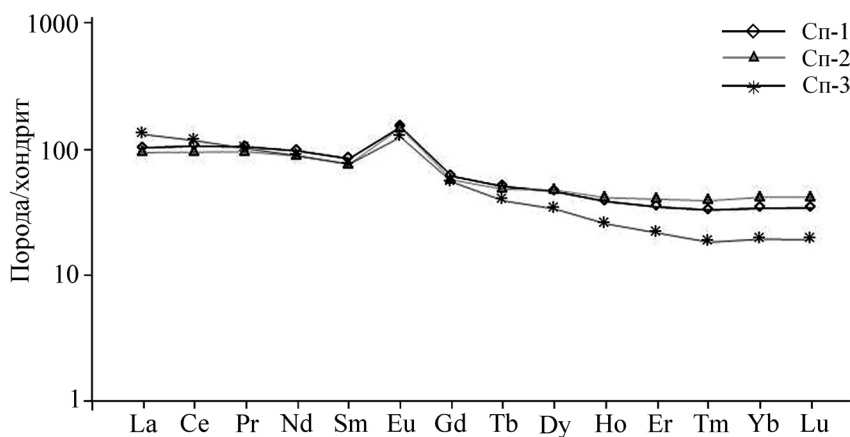


Рис. 11. Кривая распределения содержаний РЗЭ в шпинель-сапфириновых горнблендитах Тайгинского участка Южного Урала. Нормировано по [53].

См. табл. 11, ан. Сп-1, 2, 3.

Fig. 11. Distribution curve of REE contents in the spinel-sapphirine hornblendites of Taiginka area of the South Urals.

See table 11, samples Sp-1, 2, 3.

(La/Yb)_n = 3.30–9.97), слабым обогащением легкими РЗЭ (отношение (La/Sm)_n = 1.22–1.72), умеренным фракционированием тяжелых РЗЭ (отношение (Gd/Yb)_n = 1.37–2.84) и отчетливо выраженной положительной европиевой аномалией

(Eu/Eu* = 1.93–2.24) (табл. 11, рис. 11). Это свидетельствует о принадлежности протолита исследуемых пород к нижним структурным этажам континентальной коры [68]. Аналогичное поведение РЗЭ зафиксировано и в древних породах из блоков ма-

фитов и ультрамафитов в серпентинитовом меланже Ильменских гор [15]. Обращают на себя внимание повышенное содержание транзитных элементов Cr, Ni и Co в изучаемых породах и индикаторное преобладание Ni над Co ($Co/Ni = 0.16-0.20$). Такие содержания и соотношения характерны для меланократовых пород нормального ряда и меланократовых пироксенитов и эссекситов.

Содержания щелочноземельных элементов Ba и Sr невысокое, при этом наблюдается заметное преобладание Sr над Ba (соотношение $Sr/Ba = 3.8-5.7$). У высокочargedных литофильных элементов отчетливо выражена отрицательная ниобиевая аномалия, что может свидетельствовать о коровом источнике магматического расплава или вовлечении корового компонента в магматические процессы. Это же подтверждает обогащение исследуемых пород литофильными элементами, что является индикатором коровой контаминации магм [11]. Отмечается высокая степень окисленности Fe ($Fe^{3+} \gg Fe^{2+}$) как в самих горнблендитах (см. табл. 10), так и в главном породообразующем минерале – амфиболе (см. табл. 2). При этом общая железистость амфиболов из шпинель-сапфириновых горнблендитов остается низкой ($f = 0.16-0.19$).

По данным И.А. Готтман [3], горнблендиты дунит-клинопироксенит-габбровых комплексов Урало-Аляскинского типа образовались при кристаллизации остаточных флюидонасыщенных расплавов пикритобазальтового состава, возникших при дифференциации первичных высокоизвестковистых клинопироксенитовых магм. Отделившийся от ультраосновного источника горнблендитовый расплав формирует активные интрузивные тела: дайки, штоки, эруптивные брекчии, прорывающие как более ранние ультраосновные породы, так и метаморфические породы обрамления массивов, что является доказательством магматической природы горнблендитов [3, 4]. Высокая степень окисленности амфибола, сапфирина, хёгбомита и шпинели из описываемых нами сапфиринсодержащих горнблендитов Тайгинки, наличие в них миароловых участков укладываются в рамки представлений И.А. Готтман о происхождении уральских горнблендитов из флюидонасыщенных расплавов.

ОЦЕНКА ТЕРМОБАРОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОБРАЗОВАНИЯ САФИРИН-ШПИНЕЛЕВЫХ ГОРНБЛЕНДИТОВ

Для определения термобарометрических параметров образования минеральных парагенезисов исследуемых пород применяли сапфирин-шпинелевые геотермометры [39, 58, 62] и амфиболовые эмпирические геобарометры [45, 63]. Используя данные по составам сосуществующих шпинелей и сапфиринов в горнблендитах Тайгинского участка (см. табл. 3, 6), К.К. Подлесский по

Таблица 12. Вероятные значения температур и давления при формировании сапфиринсодержащих пород Тайгинского участка по разным геотермобарометрам

Table 12. Probable values of temperatures and pressures at formation of sapphirine-bearing rocks of Taiginka area on different geothermobarometers

Пробы	Авторы методик			
	[58]	[62]	[39]	[45, 63]
	T °C			P кбар
Сп-1	887	758	1023	8.95
				8.75
				8.92
				8.87
Сп-2	979	630	1141	9.25
				9.76
				12.66
				12.91
Сп-3	777	969	906	8.95
				9.09
				8.63
				9.39
Сп-13	1046	555	1241	8.77
				9.79
				9.84
				9.73
Сп-14	778	967	907	9.78
				9.78
Сп-14	745	1048	876	9.78
				9.78
Сп-14	1155	456	1439	9.78
				9.78
Сп-14	1133	474	1394	9.78
				9.78

Примечание. Значения температур определены К.К. Подлесским по данным таблиц 3, 6, а давлений – Е.В. Кориневским по данным табл. 2.

Note. Values of temperatures are determined by K.K. Podlesskii (according to tables 3, 6), and pressure – by E.V. Korinevskiy according to table 2.

нескольким геотермометрам [39, 58, 62] подсчитал возможные температуры их образования (табл. 12). Рассчитанный диапазон колебаний температуры для одного и того же образца оказался очень велик – в пределах 456–1439 °C. Самые низкие значения T зафиксированы по геотермометру [62], а самые высокие – по геотермометру [39]. По амфиболовым геобарометрам [45, 63] все исследованные образцы из сапфирин-шпинелевой ассоциации из горнблендитов Тайгинского участка характеризуются очень высокими показателями давления: их нижняя граница располагается около значения 9 кбар, а верхняя поднимается до 13 кбар.

Неоднозначными выглядят и результаты подсчетов по габбро-амфиболитам Кемпирсайского массива. По составу амфибола из них давление здесь определяется в 9.32 кбар, температура по геотермометру [58] – 1131 °C, геотермометру [62] – 476 °C. По мнению К.К. Подлесского, столь большая разница, с одной стороны, может быть обусловлена реальными различиями в химических составах минералов из сравниваемых образцов, с другой – неоднозначностью экспериментальных данных при разработке геотермометров [39, 62] или их неприме-

нимостью к окисленным сапфириновым породам [58]. В частности, геотермометр [62] основан на равновесии Fe^{2+} – Mg в экспериментальной системе сапфирин-шпинель. Очевидно, он не может быть корректно применен к нашим условиям, поскольку в сосуществующих сапфирине и амфиболе соотношение $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ в сапфирине находится в пределах 0.42–3.44 (см. табл. 3), а в амфиблах – от 0.46 до 4.26 (см. табл. 2). Следовательно, речь идет о явно окислительных условиях образования пород, для которых применение геотермометра [62] некорректно [58]. Таким образом, можно принять, что сапфирин-шпинелевые породы Тайгинского участка на основании оценок приемлемых геотермобарометров формировались в диапазоне давлений 9–12 кбар и температур 750–1400°C (см. табл. 12). Большинство оценок условий возникновения других сапфиринсодержащих пород мира также указывает на высокие значения давления (около 9.3–9.9 кбар) и температуры (около 804–852°C) [5, 31, 35, 39, 43, 51, 56, 58, 59, 67].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из обширного списка публикаций по сапфириновым породам мира следует, что в подавляющем их большинстве сообщается о высокотемпературных метаморфических и метасоматических преобразованиях, которые они предварительно претерпели. Главным образом это гранулитовый метаморфизм богатых **Al, Mg, Ca** и бедных **Si осадков и базитов** либо метасоматическая переработка будин эклогитов или плутонических пород, преимущественно оливиновых троктолитов, входящих в состав офиолитовых ассоциаций. На таком фоне редкими выглядят сведения о мантийном происхождении сапфирина [66]. Данные по сапфириновым породам Тайгинского участка подтверждают последнее утверждение. Рассмотрим подробнее наши доказательства.

Очевидно, следует исключить гранулитовый метаморфизм как возможную причину появления сапфирина в амфиболовых породах Тайгинского участка, поскольку здесь не наблюдается индикаторных минералов и комплексов пород, характерных для такого высокоградиентного метаморфического процесса.

На первый взгляд, наиболее привлекательной является распространенная гипотеза о возникновении шпинель-сапфирин-амфиболового парагенезиса при метаморфизме и инфильтрационном метасоматозе оливиновых троктолитов, входящих в состав офиолитов [35, 64, 69]. Заметим, что минеральные парагенезисы горнблендитов Тайгинки не содержат оливина, энстатита, клинопироксена, крайне редок здесь анортит. Не зафиксированы столь характерные для троктолитов друзитовые (коронарные) структуры. Сказанное не позволяет видеть в них метатроктоли-

ты. Здесь отсутствует парагенезис граната, кордиерита, жедрита, кианита, магнезита, что не дает возможность сопоставить породы Тайгинки с метасоматитами на контакте друзитовых троктолитовых габбро с кианитсодержащими гнейсами Беломорского комплекса в Карелии [64]. Шпинель-сапфириновые горнблендиты совместно с ортопироксенитами располагаются внутри линзовидного тела серпентинитового меланжа (см. рис. 2), протрузивно внедрившегося (выдавленного) в зоне локального разлома в гнейсово-сланцевой кыштымской толще (см. рис. 1). Оно не является членом офиолитовой триады, которая вообще отсутствует в Ильмено-Вишневогорской структурной зоне Южного Урала [17]. В этом смысле неправомерно сопоставлять сапфиринсодержащие породы Тайгинского участка с апотроктолитовыми амфиболитами офиолитового массива Лимузин [35]. К тому же среди минералов сапфириновых горнблендитов Тайгинского участка отсутствуют типичные для пород массива Лимузин кианит, жедрит, оливин, клинопироксен, ортопироксен, крайне редок анортит, отсутствуют высокохромистый амфибол и коронитовые структуры, а корунд не замещает первичную шпинель, нет реакционных взаимоотношений шпинели, сапфирина и амфибола: они образовались одновременно. В других телах серпентинитового меланжа этого же участка, а также по простиранию южнее наблюдается более разнообразный состав включений в серпентинитовой матрице: здесь совместно находятся глыбы анортитовых пироксен-амфиболовых габбро, гранатовых и безгранатовых клинопироксенитов, шпинелевых ортопироксенитов, анортитовых горнблендитов гранобластовой структуры очень свежего облика. Таким образом, сапфиринсодержащие горнблендиты Тайгинского участка встречены в составе единой ассоциации несомненно магматических пород, характерных для расслоенных массивов ультрамафитов Урало-Аляскинского типа, а совсем не офиолитов. О магматическом генезисе сапфирина говорит и обнаружение его кристаллов в гранатовых вебстеритах ультраосновного массива Крака на Южном Урале.

Для сапфиринсодержащих пород метаморфического или метасоматического генезиса помимо шпинели, сапфирина, Ca-Mg-амфибола, корунда и хёгбомита типоморфной является ассоциация кварца, кианита, кордиерита, жедрита, оливина, энстатита, биотита, магнезита, доломита с широко проявленным последовательным замещением одних минералов другими [25, 35, 64, 70, 71]. В породах Тайгинского участка эти минеральные ассоциации отсутствуют, явления замещения шпинели, сапфирина, хёгбомита и амфибола друг другом не наблюдаются. Более того, петрографические наблюдения (см. рис. 6) показывают наличие между зернами шпинели, сапфирина и амфибола, а также между сапфирином и хёгбомитом (см. рис. 7), между рутилом (без редкометалльной примеси), амфибо-

лом, цирконом, апатитом и монацитом индукционных поверхностей одновременного роста.

Познакомившись с рукописью нашей статьи, член-корреспондент РАН С.П. Кориковский высказал мнение о применении к нашему объекту теории биметасоматоза, основанной на представлениях Д.С. Коржинского [12] о происхождении корундовых плагиоклазитов Борзовки. Необходимым условием для ее осуществления является наличие контакта между ультраосновными породами и гипотетическим телом гранитоидов, вдоль которого и происходит биметасоматическое замещение исходных минеральных ассоциаций другими. Предполагается, что шпинель-сапфириновые горнблендиты Тайгинки возникли таким же путем на месте тела гранитоидов, правда, никаких реальных признаков его наличия здесь не зафиксировано. Более того, в описываемом районе, как и во всей Ильмено-Вишневогорской зоне, имеется много жил гранитоидов, которые являются здесь наиболее молодыми образованиями, рассекающими линзы серпентинитового меланжа, блоки гипербазитов в них и окружающие их метаморфические породы. При этом они сопровождаются хлоритовыми, вермикулитовыми и амфиболовыми оторочками, а сами остаются практически неизменными. Это можно видеть как на примере Няшевского серпентинитового массива в Ильменах и на Савелькульском месторождении антофиллит-асбеста [21], так и в Борзовском массиве оливин-энстатитовых пород. Нигде на этих участках не находят шпинель-сапфириновых горнблендитов, образовавшихся путем биметасоматических преобразований кислых пород.

Д.С. Коржинский разработал свою теорию биметасоматоза на примере корундовых плагиоклазитов (кыштымитов) Борзовки. Предполагается, что они возникли на месте прежних даек гранитных пегматитов. Если бы гипотеза Д.С. Коржинского для этого района была верна, то тела кыштымитов или шпинель-сапфириновых горнблендитов, подобных тайгинским, возникали бы почти во всех случаях, когда среди гипербазитов (и серпентинитов по ним) находились бы гранитные дайки. Этих случаев в Ильмено-Вишневогорской зоне много, а отмеченных уникальных пород в такой обстановке больше нигде не зафиксировано. Более того, в Ильменских горах выявлены многочисленные секущие метаморфиты тела корундовых сиенитов и пегматитов, имеющие все мофологические и геологические признаки образования из магматических расплавов [27]. Следует также вспомнить, что в полосчатых габбро-амфиболитах Кемпирсайского дунит-гарцбургитового массива на Южном Урале, где в больших объемах присутствует ассоциация магнезиогорнбленд + плеонаст + сапфирин + лабрадор [29], совершенно отсутствуют тела кислых пород.

Из сделанного можно сделать вывод, что гипотеза о биметасоматическом происхождении шпинель-

сапфириновых горнблендитов Тайгинки за счет преобразования гипотетического тела гранитоидов не может считаться приемлемой. В противном случае в Ильмено-Вишневогорской зоне таких объектов было бы множество, а их нет.

По минеральному составу и структурам существенно амфиболовые шпинель-сапфириновые породы Тайгинского участка подобны горнблендитам из массивов ультрамафитов Урало-Аляскинского типа. Многочисленные геологические наблюдения, петро-геохимические особенности таких горнблендитов [3, 4] с несомненностью доказывают их интрузивное происхождение. Вся совокупность изложенных фактов также свидетельствует о магматическом происхождении сапфирина из горнблендитов Тайгинского участка. Они сформированы при температурах около 750–1400°C и давлениях, близких к 9–12 кбар. Исходя из повышенного содержания в минералах ионов Fe^{3+} , это происходило при высоком потенциале кислорода. Необычной особенностью таких ультраосновных пород является присутствие редкометалльных и редкоземельных минералов: циркона, монацита, алланита, торита, уранинита, шеелита, вольфрамит, шриланкита, ильменорутила, что объясняется появлением этих минералов в поздние этапы становления породы. Породы характеризуются обогащением легкими РЗЭ, отрицательным наклоном кривой их распределения и положительной европиевой аномалией. Это свидетельствует о принадлежности указанных пород к нижним структурным этажам континентальной коры [68], что подтверждается их нахождением в виде глыб-включений в пластинах серпентинитового меланжа и их отсутствием в окружающих более молодых геологических образованиях региона. Наличие в них отрицательной ниобиевой аномалии, обогащенность литофильными элементами (см. табл. 10) также говорят о коровом источнике магматического расплава или о контаминации мантийным расплавом корового материала [11].

Из магматического расплава образовался сапфирин из ксенолита шпинелевых клинопироксенитов в кайнозойских базальтах Ханнуоба (Hannuoba) в Северном Китае [66]. Минеральный состав клинопироксенитов очень прост. Порода на 90% объема состоит из глиноземистого диопсида, содержащего тонкие ламелли ортопироксена. Изометричные выделения среди кристаллов клинопироксена слагают зерна шпинели (плеонаста) (9%). По периферии они окружены тонкой (<0.15 мм) каймой симплектитовых сростков сапфирина со шпинелью или клинопироксеном. *В краевых зонах шпинелевых зерен наблюдается чередование полосок сапфирина и шпинели, которое отражает ростовую зональность кристаллов.* Учитывая присутствие участков стекла, это говорит об образовании минералов из расплава. Авторы описания [66] подчеркивают относительную простоту минерального состава сап-

фиринсодержащих мантийных клинопироксенитов, в то время как фельзические и мафические гранулитовые ассоциации выделяются большим количеством минералов. Напомним, что сапфириновые горнблендиты Тайгинки также содержат всего 4 породообразующих минерала (амфибол, сапфирин, шпинель, хёгбомит). Остальные 26 минералов относятся к аксессуарным или постериорным.

В.Х. Su et al. [66] полагают, что шпинелевые клинопироксениты с сапфирином образовались при 850–900°C и давлении 9–10 кбар. Эти условия соответствуют глубинам 30–40 км. Здесь происходило взаимодействие насыщенного водой базальтового расплава с вмещающими перидотитами. Вероятно, в такой обстановке формировались и шпинель-сапфириновые горнблендиты Тайгинского участка Урала. Они являются редким примером экзотического по составу блока глубинных пород, выведенных на поверхность протрузией серпентинитового меланжа, а не продуктом гипотетического процесса на контакте ультрабазитов и гранитной дайки.

ВЫВОДЫ

Уникальная для Урала сапфирин-шпинель-амфиболовая порода (горнблендит) представляет собой фрагмент глубинной породы, соприкасающийся (не прорывающей!) с блоком амфиболизованных ортопироксенитов. Все они являются кластолитами в одной из линз серпентинитового меланжа в гнейсах и кристаллосланцах кыштымской толщи Ильмено-Вишневогорского комплекса. В других линзах меланжа в ближайшем окружении зафиксированы блоки пироксен-амфиболовых анортитовых габбро, гранатовых и безгранатовых клинопироксенитов с титаномagnetитом и хёгбомитом, шпинелевых ортопироксенитов, горнблендитов, перидотитов [14]. Серпентинитовый меланж не имеет пространственной и генетической связи с офиолитами, отличается от них набором мафитов и ультрамафитов. По морфологии главных породообразующих минералов (амфиболов, шпинели, сапфирина, хёгбомита) можно заключить, что они формировались одновременно без реакционных взаимоотношений. Неравномернозернистая полнокристаллическая структура горнблендитов, их массивная неориентированная текстура, отсутствие “теней” предшествующих минеральных ассоциаций, синхронное образование всех породообразующих минералов (амфибола, сапфирина, шпинели, хёгбомита), наличие первичных кристаллических включений разнообразных минералов, незначительное развитие вторичных преобразований породы заставляют признать сапфирин-шпинелевый горнблендит Тайгинского участка породой магматической. Она формировалась в диапазоне давлений 9–12 кбар и температур 750–1400°C. Примерно при таких же условиях образовались и другие сапфиринсодержащие

породы мира, традиционно считающиеся метаморфогенными или метасоматическими [5, 31, 35, 39, 43, 51, 56, 58, 59, 67].

Сапфирин-шпинелевые горнблендиты – одна из редких разновидностей этих пород, которые в виде интрузивных тел и даек неоднократно отмечались в ультрамафитовых комплексах Урало-Аляскинского типа [3, 4]. Следует напомнить, что менее чем в 60 км южнее по простиранию Ильмено-Вишневогорского комплекса в пластинах и блоках серпентинитового меланжа описаны полнокристаллические от мелко- до грубозернистых разновидности горнблендитов (шпинелевых, клинопироксеновых, гранат-корундовых, оливиновых, энстатитовых, анортитовых, апатит-гранатовых [16]), находящихся совместно с блоками других глубинных пород (несколько разновидностей анортитовых габбро, шпинелевые клинопироксениты, вебстериты, ортопироксениты, оливиниты), не образующие в окружающих породах сколько-нибудь заметных тел. Полагаем, что сапфирин-шпинелевые горнблендиты могли бы дополнить этот список. Если амфиболы из горнблендитовых кластолитов в серпентинитовом меланже Ильменских гор обладают столь же высокой железистостью (от 0.21 до 0.59 [16]), что и амфиболы из горнблендитов Светлоборского, Кытлымского и Хабаровинского массивов (от 0.32 до 0.56 [3]), то амфиболы из сапфирин-шпинелевых горнблендитов выделяются резко пониженной железистостью (0.16–0.19, см. табл. 2), высокой глиноземистостью. Этот факт может говорить о формационной разобщенности сравниваемых пород. Видимо, при формировании серпентинитового меланжа в кластолиты попадали генетически разнородные породы из основания земной коры Урала [14, 19].

Авторы весьма признательны за содействие в полевых исследованиях С.В. Колисниченко, за информационную помощь – С.П. Кориковскому, А.В. Рязанцеву, за аналитические работы – М.Н. Малярёнок, М.С. Свиренко, К.А. Филипповой, Т.В. Семеновой, Т.М. Рябухиной. При подготовке рукописи весьма важные критические замечания и предложения были сделаны С.П. Кориковским и К.К. Подлесским, которые мы по возможности учли в окончательном варианте работы. К.К. Подлесский оказал также существенную помощь в расчете кристаллохимических формул сапфирина и определении температуры его образования по разным геотермометрам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бирюков В.М. (1998) Высокобарические комплексы подвижных поясов. М.: Наука, 208 с.
2. Богатырев Б.А. (1999) Месторождения бокситов подвижных поясов земной коры (условия образо-

- вания и закономерности размещения). Дис. ... докт. геол.-мин. наук. М.: ИГЕМ РАН, 84 с.
3. Готтман И.А. (2014) Горнблендиты дунит-клинопироксенит-габбровых комплексов Урала: петрология и генезис. Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Екатеринбург: ИГиГ УрО РАН, 23 с.
 4. Готтман И.А., Пушкарёв Е.В. (2009) Геологические данные о магматической природе горнблендитов в габбро-амфиболитовых комплексах Урало-Аляскинского типа. *Литосфера*, (2), 78-86.
 5. Доливо-Добровольский Д.В. (2002) Происхождение и условия образования сапфиринсодержащих пород Центрально-Кольской гранулитовой области. Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. СПб.: ИГТД РАН, 24 с.
 6. Дорошев А.М., Малиновский И.Ю. (1974) Верхняя по давлению граница устойчивости сапфирина. *Докл. АН СССР*, **219**(4), 959-961.
 7. Ефимов А.А. (1984) Габбро-гипербазитовые комплексы Урала и проблема офиолитов. М.: Наука, 232 с.
 8. Ефимов И.А., Бурд Г.И. (1970) Региональный метаморфизм, возраст и условия формирования некоторых глубинных пород докембрия Мугоджар. *Сов. геология*, (11), 36-56.
 9. Зотов И.А. (1966) О находках сапфирина в магнезических скарнах Юго-Западного Памира. *Докл. АН СССР*, **170**(3), 684-687.
 10. Иванов О. К. (1986) Ультрамафические пегматиты пироксенит-дунитовых массивов Платиноносного пояса Урала. Свердловск: УНЦ АН СССР, 58 с.
 11. Интерпретация геохимических данных (2001) Под ред. Е.В. Склярова. М.: Интермет Инжиниринг, 288 с.
 12. Коржинский Д.С. (1955) Очерк метасоматических процессов. Контактново-реакционные образования, связанные с гипербазитами. *Основные проблемы в учении о магматогенных рудных месторождениях*. М.: Изд-во АН СССР, 411-415.
 13. Кориковский С.П., Путиш М. (2002) Оливин-ортопироксен-амфибол-талк-хлоритовые метасерпентиниты в среднетемпературном метаморфическом комплексе Северного Вепорика (Западные Карпаты): фазовые равновесия, параметры метаморфизма, сравнение с ассоциациями гнейсов и амфиболитов. *Петрология*, (10), 3-29.
 14. Кориневский Е.В. (2013). Хаотические образования Ильменогорского метаморфического комплекса Южного Урала и их природа. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 112 с.
 15. Кориневский В.Г., Баженова Л.Ф. (2008) Редкоземельные элементы в мафитах и ультрамафитах Ильменских гор. *Уральский минералогический сборник*, (15). Миасс; Екатеринбург: ИМин УрО РАН, 50-58.
 16. Кориневский В.Г., Кориневский Е.В. (2007) Ильмены: не только минералами едиными... *Уральский минералогический сборник*, (14). Миасс: ИМин УрО РАН, 153-211.
 17. Кориневский В.Г., Кориневский Е.В. (2008) Нет рифейским офиолитам в Ильменогорском комплексе! *Структурно-вещественные комплексы и проблемы геодинамики докембрия фанерозойских орогенов. Материалы международной научной конференции*. Екатеринбург: УрО РАН, 55-58.
 18. Кориневский В.Г., Кориневский Е.В. (2014) Новое доказательство позднепалеозойского возраста кварцито-сланцевых толщ обрамления Ильменогорского комплекса (Южный Урал). *Докл. АН*, **455**(4), 553-555.
 19. Кориневский В.Г., Кориневский Е.В. (2014) Фрагменты пород основания земной коры в структуре Ильмено-Вишневогорского комплекса. *Уральский геологический журнал*, (1), 68-72.
 20. Ленных В.И., Рассказова А.Д., Петров В.И. (1986) Сапфирин-шпинелевая ассоциация Ильмено-Вишневогорского комплекса. *Новые и малоизученные минералы и минеральные ассоциации Урала*. Свердловск: УНЦ АН СССР, 76-77.
 21. Месторождения антофиллит-асбеста СССР (1976) Под ред. И.Ф. Романовича. М.: Недра, 247 с.
 22. Минералы (1981) Справочник, **III**(2). М.: Наука, 614 с.
 23. Озеров К.Н. (1933) Месторождение наждака Прииртяшского района Уральской области. *Труды Всесоюзного геолого-разведочного объединения*, **246**. Л.; М.: Госгеолтехиздат, 75 с.
 24. Панях Н.А., Соболев С.В., Петрова Т.Л., Меламедов С.В. (1983) Природа амфиболитов Кемпирсайского и Мамытского массивов. *Изв. АН СССР. Сер. геол.*, (2), 25-37.
 25. Подлесский К.К. (2010) Устойчивость сапфиринсодержащих ассоциаций в системе $\text{FeO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ и P - T условия метаморфизма высокоглиноземистых гранулитов. *Петрология*, **18**(4), 369-386.
 26. Попов В.А. (2011) Практическая генетическая минералогия. Екатеринбург: УрО РАН, 167 с.
 27. Попов В.А., Попова В.И. (2006) Минералогия пегматитов Ильменских гор. *Минералогический альманах*, **9**. М.: ЭКОСТ, 152 с.
 28. Ферштатер Г.Б., Пушкарев Е.В. (1987) Магматические клинопироксениты Урала и их эволюция. *Изв. АН СССР. Сер. геол.*, (3), 13-23.
 29. Херасков Н.П., Разумова В.Н. (1967) Гипербазитовая формация Кемпирсайского массива Южного Урала и ассоциирующие с ней габбро-амфиболиты. *Тектоника и формации*. М.: Наука, 103-141.
 30. Юшкин Н.П., Иванов О.К., Попов В.А. (1986) Введение в топоминералогию Урала. М.: Наука, 294 с.
 31. Ackermann D., Seifert F., Schreyer W. (1975) Instability of sapphirine at high pressures. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **50**, 79-92.
 32. Allard G.O., Fujimori S. (1966) A new occurrence of sapphirine in Salvador, Bahia, Brazil. *Can. Mineral.*, **8**, 660.
 33. Arima M., Barnett R.L. (1984) Sapphirine bearing granulites from the Sipiweesk Lake area of the late Archean Pikwitonei granulite terrain, Manitoba, Canada. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **88**, 102-112.
 34. Armbruster T. (2002) Revised nomenclature of högbomite, nigerite, and taaffeite minerals. *Eur. J. Miner.*, **14**, 389-395.
 35. Berger J., Féménias O., Ohnenstetter D., Plissart G., Mercier J.-C.C. (2010) Origin and tectonic significance of corundum-kyanite-sapphirine amphibolites from the Variscan French Massif Central. *J. Metamorph. Geol.*, **28**, 341-360.
 36. Boncroft G.M., Burns R.G., Stone A.J. (1968) Applications of the Mössbauer effect to silicate mineralogy. II. Iron silicates of unknown and complex crystal structures. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, **32**, 547-590.

37. Caderon S., Trzcienski W., Bedard J.H., Goulet N. (2005) An occurrence of sapphirine in the Archean Superior Province, Northern Quebec. *Can. Mineral.*, **43**, 463-478.
38. Christy A.C., Phillips B.L., Güttler B.K., Kirkpatrick R.J. (1992) Al²⁷/Al²⁹ and Si MAS NMP and infrared spectroscopic study of Al-Si ordering in natural and synthetic sapphirine. *Amer. Mineral.*, **77**, 8-18.
39. Das K., Fujino K., Tomioka N., Miura H. (2006) Experimental data on Fe and Mg partitioning between coexisting sapphirine and spinel: an empirical geothermometer and its application. *Eur. J. Mineral.*, **18**(1), 49-58.
40. Deer W.A., Howie R.A., Zussmann J. (1997) Rock-forming minerals. Geol. Soc. London, 919 p.
41. Droop G.T.R. (1987) A general equation for estimating Fe³⁺ concentrations in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses, using stoichiometric criteria. *Miner. Mag.*, **51**(361), 431-435.
42. Giovanardi T., Morishita T., Zanetti A., Mazzucchelli M., Vannucci R. (2013) Igneous sapphirine as a product of melt-peridotite interactions in the Finero phlogopite-peridotite massif, Western Italian Alps. *Eur. J. Mineral.*, **25**(1), 17-31.
43. Grew E.S. (1980) Sapphirine + quartz association from Archean rocks in Enderby Land, Antarctica. *Amer. Mineral.*, **65**, 821-836.
44. Grew E.S., Hålenius U., Pasero M., Barbier J. (2008) Recommended nomenclature for the sapphirine and surinamite groups (sapphirine supergroup). *Mineral. Mag.*, **72**(4), 839-876.
45. Hammarström J.M., Zen E.-A. (1986) Aluminium in hornblende: an empirical igneous geobarometer. *Amer. Mineral.*, **71**(11/12), 1297-1313.
46. Handbook of Mineralogy (2001) **2**(1). Tucson, 107 p.
47. Harley S.L. (1986) A sapphirine-cordierite-garnet-silimanite granulite from Enderby Land, Antarctica: implications for FNAS petrogenetic grids in the granulite facies. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **94**, 452-460.
48. Hawthorne F.C., Oberti R., Harlow J.E. et al. (2012) Nomenclature of the amphibole supergroup. *Amer. Mineral.*, **97**, 2031-2048.
49. Janardhanan A.S., Leake B.E. (1974) Sapphirine in the Sittampundi complex, India. *Mineral. Mag.*, **39**, 901-902.
50. Johnson A.M. (1998) Textural and chemical relations among spinel-sapphirine-garnet-orthopyroxene, Salt Hill emery mine, Cortlandt complex. N. Y., 138 p.
51. Kushiro I., Yoder H.S. (1966) Anorthite-forsterite and anorthite-enstatite reactions and their bearing on the basalt-eclogite transition. *J. Petrol.*, **7**, 337-363.
52. Locock A.J. (2014) An Excel spreadsheet to classify chemical analyses of amphiboles following the IMA 2012 recommendations. *Computers & Geosciences*, **62**, 1-11.
53. McDonough W.F., Sun S. (1995) The composition of the Earth. *Chem. Geol.*, **120**, 223-253.
54. McKie D. (1963) The hōgbomite polytypes. *Mineral. Mag.*, **33**, 563-580.
55. Meng L.N., Moore J.M. (1972) Sapphirine-bearing rocks from Wilson Lake, Labrador. *Can. Mineral.*, **11**, 777-790.
56. Meyer H.O.A., Brookins D.G. (1976) Sapphirine, silimanite, and garnet in granulite xenoliths from Stockdale kimberlite, Kansas. *Amer. Mineral.*, **61**, 1194-1202.
57. Morozov M., Dolivo-Dobrovolsky D.V., Azimov P., Musso M., Asenbaum A., Amthauer G. (2001) Polarized micro-Raman spectra of natural sapphirine single crystals. *Beihfte zum Eur. J. Mineral.*, **13**(1), 128.
58. Owen J.V., Greenough J.D. (1991) An empirical sapphirine-spinel Mg-Fe exchange thermometer and its application to high grade xenoliths in the Popes Harbour dyke, Nova Scotia, Canada. *Lithos.*, **26**, 317-332.
59. Raith M.M., Rakotondrazafy R., Sengupta P. (2008) Petrology of corundum-spinel-sapphirine-anorthite rocks (sakenites) from the type locality in southern Madagascar. *J. metamorph. Geol.*, **26**, 647-667.
60. Roduit N. (2014) JMicroVision: Image analysis toolbox for measuring and quantifying components of high-definition images. Version 1.2.7. <http://www.jmicrovision.com>.
61. RRUFF Project (2015) An integrated database of Raman spectra, X-ray diffraction and chemistry data for minerals. <http://rruff.info>.
62. Sato K., Miyamoto T., Kawasaki T. (2006) Experimental calibration of sapphirine-spinel Fe²⁺-Mg exchange thermometer: Implication for constraints on P-T condition of Howard Hills, Napier Complex, East Antarctica. *Gondwana Research.*, **9**, 398-408.
63. Schmidt M.W. (1991) Experimental calibration of the Al-in-hornblende geobarometer at 650°C, 3.5-13.0 kbar. *Terra abstracts*, **3**(1), 30.
64. Sengupta P., Raith M.M., Levitsky V.I. (2004) Compositional characteristics paragenetic relations of magnesiohōgbomite in aluminous amphibolites from the Belomorian complex, Baltic Shield, Russia. *Amer. Mineral.*, **89**, 819-831.
65. Sørensen H. (1955) On sapphirine from West Greenland. *Meddelelser om Grønland*, **137**(1), 3-32.
66. Su B.X., Zhang H.F., Santosh M., Tang Y.J., Xiao Y. (2012) The genesis of mantle-derived sapphirine. *Amer. Mineral.*, **97**, 856-863.
67. Taylor F.G. (1980) Two sapphirine localities in New Quebec. *Can. Mineral.*, **18**, 373-374.
68. Taylor S.R., McLennan S.M. (1985) The continental crust: its composition and evolution. Oxford, 312 p.
69. Tenthorey E.A., Ryan J.G., Snow E.A. (1996) Petrogenesis of sapphirine-bearing metatrolites from the Buck Creek ultramafic body, southern Appalachians. *J. metamorph. Geol.*, **14**, 103-114.
70. Tsunogae T., Santosh M. (2005) Ti-free hōgbomite in spinel- and sapphirine-bearing Mg-Al rock from the Palghat-Cauvery shear zone system, Southern India. *Miner. Mag.*, **69**(6), 937-949.
71. Xiang Hua, Zhong Zeng-Qiu Li Ye, Qi Min, Zhou Han-Wen, Zhang Li, Zhang Ze-Ming, Santosh M. (2014). Sapphirine-bearing granulites from the Tongbai orogen, China: Petrology, phase equilibria, zircon U-Pb geochronology and implications for Paleozoic ultrahigh temperature metamorphism. *Lithos.*, **208-209**, 446-461.
72. Waldmann L. (1931) Studien in Raume des Kartenblattes Drozendorf I. Der Sapphirin förende Gabbro von Stallek. *Verhandlungen der Geologischen Bundesanstalt*, 79-84.
73. Whitney D.L., Evans B.W. (2010) Abbreviations for names of rock-forming minerals. *Amer. Mineral.*, **95**, 185-187.

The sapphirine-spinel hornblendites of Il'meno-Vishnevogorsky complex

V. G. Korinevsky, E. V. Korinevsky, V. A. Kotlyarov, S. M. Lebedeva,
I. A. Blinov, A. B. Mironov, M. B. Shtenberg

Institute of Mineralogy Urals Branch of RAS

The authors consolidated disparate information about sapphirine-bearing rocks of the Urals. It is shown that they belong to genetically different entities. There are the intrusive rocks (hornblendites, gabbros), bodies of eclogites and eclogite-like rocks, high-metamorphized Paleozoic bauxite (emery rocks). Given the most complete petrographic and mineralogical characteristics the corundum-bearing sapphirine-spinel hornblendites which compose clastolite blocks in lenses of serpentinite melange among Kyshtim suite gneisses of the Il'meno-Vishnevogorsky complex. For the first time the data of X-ray, Mössbauer and Infrared spectroscopy of sapphirine from the hornblendites, chemical compositions of most minerals in the rocks are given. The conclusion about the magmatic origin of the sapphirine-spinel hornblendites of the Urals is made.

Key words: *sapphirine, spinel, högbomite, pargasite, hornblendites, orthopyroxenites, gabbro-amphibolites, eclogites, Urals.*

REFERENCES

1. Birjukov V.M. (1998) *Vysokobaricheskie kompleksi podvizhnykh pojasov* [High-pressure complexes of mobile belts]. Moscow, Nauka Publ., 208 p. (In Russian)
2. Bogatyr'ov B.A. (1999) *Mestorozhdeniya boksitov podvizhnykh pojasov zemnoy kory (usloviya obrazovaniya i zakonomernosti razmeshcheniya)*. Dis. ... dokt. geol.-min. nauk [Bauxite deposits of the mobile belts of the earth's crust (conditions of formation and regularities of distribution). Dr geol and min sci.diss.]. Moscow: IGM RAS, 84 p. (In Russian)
3. Gottman I.A. (2014) *Gornblendity dunit-klinopiroksenit-gabbrovyykh kompleksov Urala: petrologiya i genesis*. Avtoref. dis. ... cand. geol.-min. nauk [Hornblendites of dunite-clinopyroxenite-gabbroic complexes of the Urals: petrology and genesis. Cand. geol and min sci. diss. abstr.]. Ekaterinburg, IGG UB RAS, 23 p. (In Russian)
4. Gottman I.A., Pushkarjov E.V. (2009) Geological data on the magmatic origin of hornblendites in gabbro-amphibolite complexes of Ural-Alaska type. *Litosfera*, (2), 78-86. (In Russian)
5. Dolivo-Dobrovolskiy D.V. (2002) *Proischozhdenie i usloviya obrazovaniya sappfirinsoderzhashchich porod Tsentralno-Kolskoy granulitovooy oblasti*. Avtoref. dis. ... dokt. geol.-min. nauk [The origin and conditions of formation of sapphirine-bearing rocks of the Central Kola granulite area. Dr. geol. and min. sci. diss. abstr.]. Sankt-Petersburg, IGG RAS, 24 p. (In Russian)
6. Doroshev A.M., Malinovskiy I.Yu. (1974) Upper pressure stability boundary of sapphirine. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, **219**(4), 959-961. (In Russian)
7. Efimov A.A. (1984) *Gabbro-giperbasitovye komplekсы Urala i problema ofiolitov* [Gabbro-hyperbasite complexes of Urals and problem of ophiolites]. Moscow, Nauka Publ., 232 p. (In Russian)
8. Efimov I.A., Burd G.I. (1970) Regional metamorphism, age and conditions of formation of some plutonic rocks of Pre-Cambrian rocks of the Mugodzhary. *Sov. Geologiya*, (11), 36-56. (In Russian)
9. Zotov I.A. (1966) On the findings of sapphirine in magnesian skarns of South-Western Pamir]. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, **170**(3), 684-687. (In Russian)
10. Ivanov O.K. (1986) *Ultramaficheskie pegmatity pyroksenit-dunitovykh massivov Platinonosnogo pojasa Urala* [Ultramafic pegmatites of pyroxenite-dunite massifs of the Uralian Platinaferous belt]. Sverdlovsk: UNTs Akad. Nauk SSSR, 58 p. (In Russian)
11. *Interpretatsiya geokhimicheskikh dannykh* (2001) (Ed. E.V. Sklyarov) [The interpretation of geochemical data. (Ed. E.V. Sklyarov)]. Moscow, Intermet Inzhiniring Publ., 288 p. (In Russian)
12. Korzhinskii D.S. (1955) Essay on metasomatic processes. Contact-reaction formations, associated with ultrabasic rocks. *Osnovnye problemy v uchenii o magmatogennykh rudnich mestorozhdeniyakh* [Main problems in the study of magmatic ore deposits]. Moscow, Akad. Nauk SSSR, 411-415. (In Russian)
13. Korikovskiy S.P., Putish M. (2002) The olivine-orthopyroxene-amphibole-talc-chlorite metaserpentinities in the medium-temperature metamorphic complex of Northern Viorica (Western Carpathians): phase equilibria, parameters of metamorphism, a comparison with the associations of gneisses and amphibolites. *Petrologiya*, (10), 3-29. (In Russian)
14. Korinevsky E.V. (2013) *Chaoticheskie obrazovaniya Ilmenogorskogo metamorficheskogo kompleksa i ich priroda* [The chaotic formations of the Ilmenogorsky metamorphic complex of the Southern Urals and their nature]. Ekaterinburg: Urals Branch of RAS Publ, 112 p. (In Russian)
15. Korinevsky V.G., Bazhenova L.F. (2008) Rare earth elements in mafic and ultramafic rocks of the Ilmeny mountains. *Uralskiy mineralogicheskiy sbornik*, (15). [Urals Mineralogical collection (15)] Miass; Ekaterinburg, Institut Mineralogii Uralskogo otdeleniya Akad. Nauk Rossii, 50-58. (In Russian)
16. Korinevsky V.G., Korinevsky E.V. (2007) Ilmeny: not only minerals... *Uralskiy mineralogicheskiy sbornik*, (14). [Urals Mineralogical collection (14)] Miass, Institut Mineralogii Uralskogo otdeleniya Akademii nauk Rossii, 153-211. (In Russian)
17. Korinevsky V.G., Korinevsky E.V. (2008) No Riphean ophiolites in the Ilmenogorsky complex! *Strukturno-veshchestvennye komplekсы i problemy geodinamiki*

- dokembrija fanerozoiskikh orogenov. Materialy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Structural-material complexes and problems of Precambrian geodynamics of Phanerozoic orogens. Proceedings of the International Scientific conference]. Ekaterinburg, UB RAS, 55-58. (In Russian)
18. Korinevsky V.G., Korinevsky E.V. (2014) New evidence of the late Paleozoic age of the quartzite-shale strata framing of the Ilmenogorsk complex (the Southern Urals). *Dokl. Akad. Nauk*, **455**(4), 553-555. (In Russian)
 19. Korinevsky V.G., Korinevsky E.V. (2014) Fragments of rocks of the bottom of Earth's crust in the structure of the Il'meno-Vishnevogorsk complex. *Uralian geological journal*, (1), 68-72. (In Russian)
 20. Lennykh V.I., Rasskazova A.D., Petrov V.I. (1986) The sapphirine-spinel association of Il'meno-Vishnevogorsk complex. *Novye i maloizuchennye mineraly i mineralnye assotsiatsii Urala* [New and little-studied minerals and mineral associations of the Urals]. Sverdlovsk: Uralskiy nauchniy tsentr Akad.Nauk SSSR, 76-77. (In Russian)
 21. *Mestorozhdeniya antofillit-asbesta SSSR* (1976) (Ed. I.F. Romanovich) [Deposits of anthophyllite asbestos of USSR. (Ed. I.F. Romanovich)]. Moscow, Nedra Publ., 247 p. (In Russian)
 22. *Mineraly* (1981). *Spravochnik* [Minerals. Guide]. **III**(2), 614 p. (in Russian)
 23. Ozerov K.N. (1933) Emery's deposit of Priirtyshskii area of the Urals region. *Proceedings of all-Union geological exploration company*, **246**. Moscow; Leningrad, Gosgeoltekhizdat Publ., 75 p. (In Russian)
 24. Paneyakh N.A., Sobolev S.V., Petrova T.L., Melamedov S.V. (1983) The nature of the amphibolites of Kempirsay and Mamyt massifs. *Izv. Akad. Nauk SSSR. Ser. Geol.*, (2), 25-37. (In Russian)
 25. Podlesskiy K.K. (2010) Resistance of sapphirine-bearing associations in the system FeO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ and P-T conditions of metamorphism of peraluminous granulites. *Petrologiya*, **18**(4), 369-386. (In Russian)
 26. Popov V.A. (2011) *Prakticheskaya geneticheskaya mineralogiya* [Practical genetic Mineralogy]. Ekaterinburg, Urals Branch of RAS Publ., 167 p. (In Russian)
 27. Popov V.F., Popova V.I. (2006) *Mineralogiya pegmatitov Ilmenskikh gor* [Mineralogy of pegmatites of the Ilmeny mountains]. *Mineralogicheskii almanakh* [Mineralogical almanac], **9**. Moscow, EKOST Publ., 152 p. (In Russian)
 28. Fershtater G.B., Pushkarjov E.V. (1987) Magmatic pyroxenites of the Urals and their evolution. *Izv. Akad. Nauk SSSR. Ser. Geol.*, (3), 13-23. (In Russian)
 29. Kheraskov N.P., Razumova V.H. (1967) Hyperbasite formation of the Kempirsay massif of the South Urals and associating with it gabbro-amphibolites. *Tektonika i formatsii* [Tectonics and formation]. Moscow, Nauka Publ., 103-141. (In Russian)
 30. Yushkin N.P., Ivanov O.K., Popov V.A. (1986) *Vvedenie v topomineralogiyu Urala* [Introduction to topomineralogy of the Urals]. Moscow, Nauka Publ., 294 p. (In Russian)
 31. Ackermann D., Seifert F., Schreyer W. (1975) Instability of sapphirine at high pressures. *Contrib. Mineral. Petrol.* **50**, 79-92.
 32. Allard G.O., Fujimori S. (1966) A new occurrence of sapphirine in Salvador, Bahia, Brazil. *Can. Mineral.*, **8**, 660.
 33. Arima M., Barnett R.L. (1984) Sapphirine bearing granulites from the Sipiwesk Lake area of the late Archean Pikwitonei granulite terrain, Manitoba, Canada. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **88**, 102-112.
 34. Armbruster T. (2002) Revised nomenclature of högbomite, nigerite, and taaffeite minerals. *Eur. J. Mineral.*, **14**, 389-395.
 35. Berger J., Féménias O., Ohnenstetter D., Plissart G., Mercier J.-C.C. (2010) Origin and tectonic significance of corundum-kyanite-sapphirine amphibolites from the Variscan French Massif Central. *J. Metamorph. Geol.*, **28**, 341-360.
 36. Boncroft G.M., Burns R.G., Stone A.J. (1968) Applications of the Mössbauer effect to silicate mineralogy. II. Iron silicates of unknown and complex crystal structures. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, **32**, 547-590.
 37. Caderon S., Trzcienski W., Bedard J.H., Goulet N. (2005) An occurrence of sapphirine in the Archean Superior Province, Northern Quebec. *Can. Mineral.*, **43**, 463-478.
 38. Christy A.C., Phillips B.L., Güttler B.K., Kirkpatrick R.J. (1992) Al²⁷/Al²⁹ and Si MAS NMP and infrared spectroscopic study of Al-Si ordering in natural and syntetic sapphirine. *Amer. Mineral.*, **77**, 8-18.
 39. Das K., Fujino K., Tomioka N., Miura H. (2006) Experimental data on Fe and Mg partitioning between coexisting sapphirine and spinel: an empirical geothermometer and its application. *Eur. J. Mineral.*, **18**(1), 49-58.
 40. Deer W.A., Howie R.A., Zussmann J. (1997) Rock-forming minerals. Geol. Soc. London, 919 p.
 41. Droop G.T.R. (1987) A general equation for estimating Fe³⁺ concentrations in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses, using stoichiometric criteria. *Miner. Mag.*, **51**(361), 431-435.
 42. Giovanardi T., Morishita T., Zanetti A., Mazzucchelli M., Vannucci R. (2013) Igneous sapphirine as a product of melt-peridotite interactions in the Finero phlogopite-peridotite massif, Western Italian Alps. *Eur. J. Mineral.* **25**(1), 17-31.
 43. Grew E.S. (1980) Sapphirine + quartz association from Archean rocks in Enderby Land, Antarctica. *Amer. Mineral.*, **65**, 821-836.
 44. Grew E.S., Hälenius U., Pasero M., Barbier J. (2008) Recommended nomenclature for the sapphirine and surinamite groups (sapphirine supergroup). *Mineral. Mag.* **72**(4), 839-876
 45. Hammarström J.M., Zen E.-An. (1986) Aluminium in hornblende: an empirical igneous geobarometer. *Amer. Mineral.*, **71**(11/12), 1297-1313.
 46. Handbook of Mineralogy (2001) **2**(1). Tucson, 107 p.
 47. Harley S.L. (1986) A sapphirine-cordierite-garnet-silimanite granulite from Enderby Land, Antarctica: implications for FNAS petrogenetic grids in the granulite facies. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **94**, 452-460.
 48. Hawthorne F.C., Oberti R., Harlow J.E. et al. (2012) Nomenclature of the amphibole supergroup. *Amer. Mineral.*, **97**, 2031-2048.
 49. Janardhanan A.S., Leake B.E. (1974) Sapphirine in the Sittampundi complex, India. *Mineral. Mag.*, **39**, 901-902.
 50. Johnson A.M. (1998) Textural and chemical relations among spinel-sapphirine-garnet-orthopyroxene, Salt

- Hill emery mine, Cortlandt complex. N. Y., 138 p.
51. Kushiro I., Yoder H.S. (1966) Anorthite-forsterite and anorthite-enstatite reactions and their bearing on the basalt-eclogite transition. *J. Petrol.*, **7**, 337-363.
 52. Locock A.J. (2014) An Excel spreadsheet to classify chemical analyses of amphiboles following the IMA 2012 recommendations. *Computers & Geosciences*, **62**, 1-11.
 53. McDonough W.F., Sun S. (1995) The composition of the Earth. *Chem. Geol.*, **120**, 223-253.
 54. McKie D. (1963) The högbomite polytypes. *Mineral. Mag.*, **33**, 563-580.
 55. Meng L.N., Moore J.M. (1972) Sapphirine-bearing rocks from Wilson Lake, Labrador. *Can. Mineral.*, **11**, 777-790.
 56. Meyer H.O.A., Brookins D.G. (1976) Sapphirine, sillimanite, and garnet in granulite xenoliths from Stockdale kimberlite, Kansas. *Amer. Mineral.*, **61**, 1194-1202.
 57. Morozov M., Dolivo-Dobrovolsky D.V., Azimov P., Musso M., Asenbaum A., Amthauer G. (2001) Polarized micro-Raman spectra of natural sapphirine single crystals. *Beihefte zum Eur. J. Mineral.*, **13**(1), 128.
 58. Owen J.V., Greenough J.D. (1991) An empirical sapphirine-spinel Mg-Fe exchange thermometer and its application to high grade xenoliths in the Popes Harbour dyke, Nova Scotia, Canada. *Lithos.*, **26**, 317-332.
 59. Raith M.M., Rakotonirafy R., Sengupta P. (2008) Petrology of corundum-spinel-sapphirine-anorthite rocks (sakenites) from the type locality in southern Madagascar. *J. metamorph. Geol.*, **26**, 647-667.
 60. Roduit N. (2014) JMicroVision: Image analysis toolbox for measuring and quantifying components of high-definition images. Version 1.2.7. <http://www.jmicrovision.com>.
 61. RRUFF Project (2015) An integrated database of Raman spectra, X-ray diffraction and chemistry data for minerals. <http://rruff.info>.
 62. Sato K., Miyamoto T., Kawasaki T. (2006) Experimental calibration of sapphirine-spinel Fe²⁺-Mg exchange thermometer: Implication for constraints on P-T condition of Howard Hills, Napier Complex, East Antarctica. *Gondwana Research.*, **9**, 398-408.
 63. Schmidt M.W. (1991) Experimental calibration of the Al-in-hornblende geobarometer at 650°C, 3.5-13.0 kbar. *Terra abstracts*, **3**(1), 30.
 64. Sengupta P., Raith M.M., Levitsky V.I. (2004) Compositional characteristics paragenetic relations of magnesiohögbomite in aluminous amphibolites from the Belomorian complex, Baltic Shield, Russia. *Amer. Mineral.*, **89**, 819-831.
 65. Sørensen H. (1955) On sapphirine from West Greenland. *Meddelelser om Grønland*, **137**(1), 3-32.
 66. Su B.X., Zhang H.F., Santosh M., Tang Y.J., Xiao Y. (2012) The genesis of mantle-derived sapphirine. *Amer. Mineral.*, **97**, 856-863.
 67. Taylor F.G. (1980) Two sapphirine localities in New Quebec. *Can. Mineral.*, **18**, 373-374.
 68. Taylor S.R., McLennan S.M. (1985) The continental crust: its composition and evolution. Oxford, 312 p.
 69. Tenthorey E.A., Ryan J.G., Snow E.A. (1996) Petrogenesis of sapphirine-bearing metatrolites from the Buck Creek ultramafic body, southern Appalachians. *J. metamorph. Geol.*, **14**, 103-114.
 70. Tsunogae T., Santosh M. (2005) Ti-free högbomite in spinel- and sapphirine-bearing Mg-Al rock from the Palghat-Cauvery shear zone system, Southern India. *Miner. Mag.*, **69**(6), 937-949.
 71. Xiang Hua, Zhong Zeng-Qiu Li Ye, Qi Min, Zhou Han-Wen, Zhang Li, Zhang Ze-Ming, Santosh M. (2014). Sapphirine-bearing granulites from the Tongbai orogen, China: Petrology, phase equilibria, zircon U-Pb geochronology and implications for Paleozoic ultrahigh temperature metamorphism. *Lithos.*, **208-209**, 446-461.
 72. Waldmann L. (1931) Studien in Raume des Kartenblattes Drozendorf I. Der Sapphirin förende Gabbro von Stallek. *Verhandlungen der Geologischen Bundesanstalt*, 79-84.
 73. Whitney D.L., Evans B.W. (2010) Abbreviations for names of rock-forming minerals. *Amer. Mineral.*, **95**, 185-187.