УДК 552.11 (470.55)

DOI: 10.24930/1681-9004-2021-21-3-386-408

Энстатитовые нодули в гарцбургитах Южного Урала

В. Г. Кориневский

Институт минералогии УрО РАН, 456317, г. Миасс, Челябинская обл., e-mail: vgkor@mineralogy.ru

Поступила в редакцию 11.12.2019 г., принята к печати 28.01.2021 г.

Объекты исследования. В тектонических линзах серпентинитового меланжа среди гранат-биотитовых гнейсов Ильменогорско-Вишневогорского комплекса на Южном Урале в двух пунктах на северном побережье оз. Увильды обнаружены выходы редких пород – нодулярных гарцбургитов. Они слагают крутопадающие тела мощностью около 9 м среди амфиболитизированных ортопироксенитов. **Главные результаты.** Мелкозернистая серпентинизированная энстатит-оливиновая матрица гарцбургитов включает в себе многочисленные сферические образования (нодулы) диаметром 2–7 см, сложенные сростками крупных кристаллов энстатита с редкими выделениями форстерита. По составу и строению эти сфероиды очень напоминают энстатитовые хондры из каменных метеоритов, отличаясь от них размерами (в десятки раз крупнее). **Выводы.** Подобные структуры в гипербазитах очень редки и встречаются в малоизмененных разновидностях. По микроструктурным особенностям и взаимоотношениям главных минералов сделан вывод об их кристаллизации из магматического расплава

Ключевые слова: гарцбургиты, энстатитовые нодулы, Южный Урал

Enstatite nodules in the harzburgites of the Southern Urals

Victor G. Korinevsky

Institute of Mineralogy UB RAS, Miass, Chelyabinsk oblast 456317 Russia, e-mail: vgkor@mineralogy.ru

Received 11.12.2019, accepted 28.01.2021

Research subject. At two points on the northern shore of Lake Uvil'dy in the Southern Urals, two outcrops of unique rocks – nodular harzburgites – were discovered in the tectonic lenses of serpentinite melange among garnet-biotite gneisses of the Ilmenogorsko-Vishnevogorsky Complex. These outcrops form a body of about 9 m in thickness among amphibolized orthopyroxenites. **Results.** The fine-grained serpentinitized enstatite-olivine matrix of the harzburgites under study contains numerous spherical formations (nodules) 2–7 cm in diameter, composed of large enstatite crystals and rare forsterite grains. The composition and structure of these spheroids are highly similar to the enstatite chondrules from stony meteorites, although differing in size (ten times larger). **Conclusions.** Such structures are very rare in hyperbasites and occur in slightly altered varieties. Judging by the microstructural features and relationships of the main minerals, it is concluded that these minerals were crystallized from a magmatic melt.

Keywords: harzburgites, enstatite nodules, the Southern Urals, Russia

ВВЕДЕНИЕ

Хондры – это небольшие (до 1–5 мм) шаровидные или эллипсоидальные минеральные агрегаты, состоящие из энстатита и оливина, реже – стекла, анортита, железоникелевых минералов. Они встречаются только в каменных метеоритах (Левин,

1965; Mueller, Saxena, 1977; Петрографический словарь, 1981). Далее описываются морфологически сходные образования (нодулы), впервые встреченные в составе отдельных тел гарцбургитов на Южном Урале. Эти уникальные породы были обнаружены минералогом-любителем В.М. Лежневым в двух пунктах на северном побережье оз. Увильды

Для цитирования: Кориневский В.Г. (2021) Энстатитовые нодулы в гарцбургитах Южного Урала. *Литосфера*, **21**(3), 386–408. DOI: 10.24930/1681-9004-2021-21-3-386-408

For citation: Korinevsky V.G. (2021) Enstatite nodules in the harzburgites of the Southern Urals. *Litosfera*, **21**(3), 386–408. DOI: 10.24930/1681-9004-2021-21-3-386-408

в Кыштымском районе Челябинской области. При активном содействии С.В. Колисниченко нами были отобраны образцы пород и произведено дальнейшее их изучение. Полученные результаты могут изменить современные представления о состоянии вещества в момент формирования гарцбургитов.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Аналитические работы выполнялись в Институте минералогии УрО РАН, г. Миасс. Образцы горных пород были отобраны В.Г. Кориневским. Петрографические исследования проводились на микроскопе “Олимпус” в шлифах и полированных образцах. Отбор минералов для анализов проводился вручную под бинокулярным микроскопом. Микрондовый анализ всех минералов проведен В.А. Котляровым с использованием сканирующего электронного микроскопа REMMA-202M, оборудованного LZ-5 Link Systems EDS, с ускоряющим напряжением 25 кВ и сфокусированного пучка диаметром 2 мкм. В качестве стандартов применялись препараты из шашки ASTM JMEX Scientific Limited MJNM 25-53, серия Mineral Mount № 01-044 и минералы известного состава. Коррекция аналитических данных произведена с использованием программ Magallanes и ZAF. Химический анализ горных пород проводился силикатным методом (аналитик М.Н. Маляренко). Определение редкоземельных элементов в гарцбургитах методом ICP-MS выполнено К.А. Филипповой в Институте минералогии УрО РАН, Миасс. Кислотное разложение горных пород осуществляли в микроволновой системе разложения SpeedWave (Berghoff, Германия) во фторопластовых автоклавах с двухстадийным нагревом до 180 °С в течение 40 мин со смесью кислот HF, HCl и HNO₃. Для метрологического контроля качества анализа использовался международный стандарт базальта BCR-2. Прибор калибровали с применением стандартных многоэлементных растворов Agilent для всей шкалы массы анализируемых элементов. Анализ приготовленных растворов проводился методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на приборе Agilent 7700x (Япония). Видовой состав амфиболов определялся в соответствии с рекомендациями (Hawthorne et al., 2012) с помощью компьютерной программы (Locock, 2014). Аббревиатуры для названий минералов использованы согласно рекомендациям (Whitney, Evans, 2010). Расчет содержаний FeO и Fe₂O₃ в хромшпинелидах произведен по предоставленной A.L Locock (University of Alberta, Canada) программе https://www.eas.ualberta.ca/eml/files/16-oxide_charge_balance_spreadsheet_Jul30-2019.xlsx.

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА

В восточном обрамлении Ильменогорско-Вишневогорского магматометаморфического комплекса на Южном Урале среди гнейсов, кварцитов и амфиболитов кыштымской толщи вдоль линий локальных тектонических разломов нередко отмечаются неравномерно рассредоточенные линзовидные участки распространения серпентинитового меланжа с включениями глыб и блоков габброидов, пироксенитов, горнблендитов, перидотитов, дунитов. Протяженность таких тел редко превышает 1 км, а мощность иногда достигает нескольких сотен метров. Набор пород из включений в разных линзах меланжа нередко существенно различается. Важно, что в окружающих толщах эти породы не образуют сколь-нибудь заметных выходов. Это свидетельствует о чужеродном по отношению к вмещающим геологическим образованиям более древнем происхождении пород меланжа, их глубинных источниках (Кориневский, Кориневский, 2006; Рязанцев и др., 2007). Обращает на себя внимание нахождение среди них удивительно свежих разновидностей анортитовых габбро, пироксенитов, слабоизмененных перидотитов, пироксенитов, горнблендитов (Кориневский, Кориневский, 2006, 2014; Кориневский и др., 2017).

В одной из таких меридиональных линз серпентинитового меланжа, расположенной среди гранат-биотитовых гнейсов, на северном побережье оз. Увильды В.М. Лежнев обнаружил два выхода редкой породы, описываемой далее (рис. 1, точки 1, 3). Ее визитной карточкой является наличие светлых изометричных или эллипсоидальных образований (нодулей), сложенных преимущественно разноориентированными крупными кристаллами энстатита, заключенными в темной серовато-зеленой серпентинизированной матрице, по минеральному и химическому составу соответствующей гарцбургиту (табл. 1, ан. 1–4) (Магматические горные породы, 1983), в котором нормативное содержание энстатита составляет 36–55 мол. %, а оливина – 23–40 мол. %.

Эти округлые обособления по составу и строению напоминают так называемые радиальные энстатитовые хондры из каменных метеоритов (Mueller, Saxena, 1977; Chondrules..., 2019), отличающиеся от них гигантскими размерами (до 5–7 см в поперечнике) по сравнению с 1–5 мм у типичных хондр из метеоритов (Левин, 1965; Петрографический словарь, 1981; Chondrules..., 2019). Эта необычная порфировидная структура является разновидностью редко наблюдаемых в гипербазах гломеропорфировых структур. Их присутствие в ряде массивов Урала (Крака, Нуралинского, Баженовского) проиллюстрировано Б.Н. Лапиным (2005) и отмечено в работах (Варлаков, 1978; Ферштатер, Пушкарев, 1991). Они сформированы

Рис. 1. Упрощенная геологическая схема Тайгинского участка Ильмено-Вишневогорского комплекса Южного 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 – позднепалеозойские 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 – разрывные нарушения; 6 – местонахождения нодулярных гарцбургитов (1, 3) и сапфиринодержащих пород (2).

Fig. 1. Simplified geological sketch of the Taiginsky area in Ilmeno-Vishnevogorsky complex of the South Urals. Compiled on the basis of a geological map at a scale of 1 : 50 000 by V.N. Yuretsky, V.I. Petrov et al., 1982.

1 – Proterozoic Selyankino stratum of sillimanite–garnet gneisses with interlayers of quartzites, amphibolites, plagiomigmatites and blastomylonite zones; 2 – Late Paleozoic garnet-biotite gneisses, crystalline schists, quartzites and amphibolites of the Kyshtym sequence with blastomylonite zones and pegmatite veins; 3 – Late Paleozoic gneiss-like granites and monzonitoids with vein bodies of granite pegmatites; 4 – areas of occurrence of serpentinite melange with blocks of gabbro, clino- and orthopyroxenites, ultrabases; 5 – lines of discontinuities; 6 – localities of nodular harzburgites (1, 3) and sapphirine-bearing rocks (2).

Таблица 1. Химический состав нодулярных гарцбургитов и вмещающих их ортопироксенитов Тайгинского участка Урала и гарцбургитов из лавовых потоков Корякского нагорья, мас. %

Table 1. Chemical composition of nodular harzburgites and host orthopyroxenites of the Taiginka area of the Urals and harzburgites from lava flows of the Koryak Upland, wt %

Компо- нент	Номера проб												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
SiO ₂	40.16	41.36	42.84	41.40	53.32	54.08	53.18	50.84	53.62	58.20	39.74	40.68	41.32
Al ₂ O ₃	0.87	0.75	2.07	0.63	1.16	0.78	1.63	1.83	1.42	0.66	2.24	0.77	1.03
Fe ₂ O ₃	5.23	6.24	5.23	5.75	2.27	1.76	3.71	3.56	2.78	2.11	5.42	4.13	2.07
Cr ₂ O ₃	0.42	0.08	0.17	0.14	0.27	0.18	0.20	0.18	0.17	–	0.29	0.32	0.27
FeO	2.45	1.90	2.30	3.24	4.45	4.97	3.22	3.48	4.44	4.37	1.94	2.73	4.27
MnO	0.09	0.10	0.11	0.12	0.12	0.12	0.12	0.14	0.13	0.07	0.04	0.08	0.09
MgO	37.79	36.08	35.43	37.91	33.88	34.48	33.99	34.07	33.08	32.01	36.78	39.88	43.03
CaO	0.32	0.40	0.24	0.42	0.51	0.20	0.19	0.10	0.12	0.10	0.40	–	0.57
NiO	0.34	0.77	0.63	0.81	0.36	0.17	0.16	0.20	0.17				
Na ₂ O	0.11	0.10	0.04	0.10	0.13	0.06	0.04	0.02	0.03	0.16	0.05	0.03	0.03
H ₂ O ⁺	11.78	12.28	10.89	9.56	3.30	2.92	3.38	5.08	3.46	2.20	11.76	10.41	6.85
H ₂ O [–]	1.10	0.50	0.48	0.42	0.26	0.24	0.20	0.38	0.30	0.16	0.82	0.54	0.15
CO ₂	<0.10	0.10	0.23	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	0.10	0.33	–	–
Сумма	100.71	100.55	100.66	100.68	100.21	99.96	100.11	99.97	99.69	100.14	99.61	99.57	99.68
Нормативное содержание (по CIPW) минералов (мол. %)													
En	35.99	44.45	54.91	38.54	84.35	87.95	87.34	82.15	88.10	86.01	37.75	35.12	22.08
Ol	40.74	31.83	23.56	39.75	4.30	3.85	–	4.22	–	–	38.02	45.98	64.07
Mag	7.11	6.0	7.15	8.34	3.29	2.55	5.38	5.16	4.03	3.06	5.81	5.99	3.00
Chr	0.62	0.12	0.25	0.21	0.40	0.27	0.29	0.27	0.25	0.18	0.43	0.47	0.40

Примечание. Здесь и в табл. 2–5 прочерк – не обнаружено, пустая клетка – нет данных. 1–4 – нодулярные гарцбургиты: 1, 2 – Тайгинский участок, 3, 4 – Увильдинский; 5–9 – энстатитовые нодулы из гарцбургитов: 5, 6 – Тайгинский участок, 7–9 – Увильдинский участок; 10 – антофиллитизированные ортопироксениты; 11–13 – массивные гарцбургиты из внутренней части лавовых потоков из вулканоструктуры горы Длинной на Корякском нагорье (Белый, Гельман, 1983). Содержания P₂O₅, K₂O, CoO, V₂O₃ и TiO₂ < 0.01–0.05 мас. %.

Note. In Tables 1–5 dash – not found, empty cell – no data. 1–4 – nodular harzburgites: 1, 2 – Taiginka area, 3, 4 – Uvildinsky area; 5–9 – enstatite nodules from harzburgites: 5, 6 – Taiginka area, 7–9 – Uvildinsky; 10 – anthophyllitized orthopyroxenites; 11–13 – massive harzburgites from the inner part of lava flows from the volcano structure of Mount Dlinnaya in the Koryak Upland (Belyi, Gel'man, 1983). The contents of P₂O₅, K₂O, CoO, V₂O₃ and TiO₂ < 0.01–0.05 wt %.

небольшими скоплениями более крупных, чем в основной массе породы, гипидиоморфных кристаллов энстатита до 3–5 мм в поперечнике. Окружных сгущений таких зерен энстатита с резкими границами с окружающей оливин-серпентиновой массой здесь не зафиксировано.

Нодулярные гарцбургиты в окрестностях пос. Тайгинка (см. рис. 1, точка 1) обнажены на гребне невысокой (около 4 м) грядки, прослеженной среди березово-соснового леса по азимуту 70° на 18 м. Координаты западной части выходов этих пород, вскрытых закопашкой, 55°36'33.9" с. ш., 60°27'48.6" в. д. На северо-восточном окончании грядки нодулярные гарцбургиты сменяются выходами массивных крупнозернистых антофиллитизированных энстатитовых пород (метаорто-

пироксенитов, см. табл. 1, ан. 10). Эти же породы слагают южный склон грядки, где зачисткой был вскрыт почти вертикальный контакт их с нодулярными гарцбургитами. Контакт отчетливый, но без зон закалки и проявлений тектоники. Таким образом, в плане нодулярные гарцбургиты обнажаются среди амфиболитизированных ортопироксенитов на площади 9 × 18 м. Все эти породы располагаются в пределах меридиональной полосы выходов преимущественно амфиболитизированных ортопироксенитов, в которой по простиранию южнее (см. рис. 1, точка 2) обнажаются оливинсодержащие амфиболовые ортопироксениты с блоком также уникальных для Урала сапфири-шпинелевых горн-блендитов и дайкой гигантозернистых ортопироксенитов (Кориневский и др., 2017).

Выходы тремолитизированных и антофиллитизированных ортопироксенитов непрерывно прослеживаются в виде меридиональной полосы шириной 200–300 м от Тайгинского участка, где впервые встречены нодулярные гарцбургиты (см. рис. 1, точка 1), на юг вплоть до Увильдинского участка (см. рис. 1, точка 3). В пределах меридиональной полосы гривки ортопироксенитов в большинстве своем вытянуты субшироко. Это свидетельствует о тектонических ограничениях полосы их выходов. Вмещающие их породы обнажены плохо, обычно это щебенка биотитовых и биотит-гранатовых гнейсов под слоем дерна или в выворотах корней деревьев.

В 2.4 км южнее Тайгинского участка на северном побережье оз. Увильды в пределах поселка у санатория “Лесное озеро” В.М. Лежнев отыскал еще одно обнажение нодулярных гарцбургитов. Оно представляет собой южный склон холма высотой около 3 м у проулка между зданиями. Координаты обнажения – 55°34'48.7" с. ш., 60°28'07.4" в. д. (см. рис. 1, точка 3). Гарцбургиты здесь более крупнозернистые (кристаллы энстатита достигают 1 см), но участками сильно брекчированы и изменены. Порода приобретает вид брекчии, в которой темные угловатые обломки серпентинизированного гарцбургита сцементированы буровато-серой массой халцедона, хлорита, талька и флогопита. В нижней части склона сохранились выходы нодулярных гарцбургитов с необычно большими по размерам (до 5–7 см) изометричными и овальными энстатитовыми сростками (меганодулями).

ПЕТРОГРАФИЯ НОДУЛЯРНЫХ ГАРЦБУРГИТОВ

Пятнистые породы темного зеленовато-серого цвета имеют отчетливо выраженную порфировидную структуру. Она проявлена в виде овальных или округлых в сечении пятен светлого зеленовато-белого цвета с кремовым оттенком поперечником от 2 до 7 см, относительно равномерно распределенных в темной мелкозернистой матрице (рис. 2). В элювиальной дресве этим пятнам соответствуют изометричные сфероподобные образования с относительно гладкой или шероховатой поверхностью серовато-коричневого или зеленовато-серого цвета (рис. 3). Сложены эти сфероподобные тела (нодули) сростками крупных кристаллов энстатита длиной 3–7 см, в которых отчетливо проявлена призматическая спайность (рис. 4). Большинство сфер образованы сростками нескольких кристаллов энстатита произвольной ориентировки (см. рис. 4а, б, г), некоторые – единичными кристаллами (см. рис. 4в), которые аналогичны по строению “радиальным энстатитовым хондрам” каменных метеоритов (Mueller, Saxena, 1977; Chondrules..., 2019). Торцы кристаллов энстатита ограничены округлыми поверхностями сфе-

рических образований, но в шлифах видно, что эти кристаллы отделены от окружающего мелкозернистого энстатит-оливин-серпентинового агрегата мелкозубчатыми границами (рис. 5а, б) и каймой, где появляются мелкие выделения магнезиогорнбленда. Эту кайму можно рассматривать как продукт реакционного взаимодействия вещества нодулей и окружающей матрицы породы. Подобное явление нередко отмечается на границе фенокристаллов-вкрапленников и основной массы в излившихся лавах. Границы нодулей с окружающей их массой повсеместно резкие, без взаимопереходов и зоны закалки. Местами цементирующая масса образует заливы в нодулях. Можно считать, что округлые сростки кристаллов энстатита по отношению к окружающей цементирующей массе проявляют себя как обычные гломеропорфировые образования в магматических породах, в частности в гарцбургитах (Белый, Гельман, 1983; Лапин, 2005). Их специфика заключается в сферической форме и больших размерах индивидов энстатита. Нодули нередко своим удлинением располагаются субпараллельно (см. рис. 2а, в, г). Их приуроченности к трещинам в породе или определенным направлениям не отмечено. Подсчитанная с помощью программы *JMicroVision* (Roduit, 2014) занимаемая нодулями энстатита площадь в образцах гарцбургитов на рис. 2а составляет 13%, 2в – 44, 2г – 49, 7а – 10%.

В пределах энстатитовых нодулей нередко наблюдаются голубовато-зеленые кристаллы вторичных амфиболов (тремолита, магнезиогорнбленда) длиной до 1–5 мм (см. рис. 4б). Состав тремолита (табл. 2, ан. 13) аналогичен составу тремолита из вмещающей нодули породы (табл. 3, ан. 10, 11). Иногда магнезиогорнбленд (см. табл. 2, ан. 11) образует скопления в виде более темной каймы вокруг нодулей (см. рис. 2а, б). В виде отдельных кристаллов среди зерен энстатита в нодулях изредка наблюдается паргасит (см. табл. 2, ан. 12). Помимо тремолита вдоль трещин спайности в энстатите из нодулей часто развивается тонкозернистый листоватый агрегат талька, нередко – светлый флогопит, реже – хлорит (см. табл. 2, ан. 2б). Редкие мелкие (0.1–0.6 мм) идиоморфные выделения внутри энстатита образуют хромшпинелиды, среди которых в пределах одного зерна можно видеть переходы от хромита к хромшпинели до хроммагнетита в краевых частях (см. табл. 2, ан. 20–27). По номенклатурной диаграмме (Павлов и др., 1979) среди хромшпинелидов в нодулях определены алюмохромиты, пикотиты, хромпикотиты, ферриалюмохромиты, субферриалюмохромиты. Преимущественно в нодулях встречаются редкие зерна пентландита размером 0.2×0.4 мм, имеющие следующий состав – $(\text{Ni}_{4.43}\text{Fe}_{4.20}\text{Co}_{0.02})_{8.65}\text{S}_8$. Кристаллы оливина (форстерита) в составе нодулей встречаются крайне редко (см. рис. 5в). Их состав (см. табл. 2, ан. 6–9) практически не отличается

Рис. 2. Распределение энстатитовых нодулей (светлое) в серпентинизированной матрице гарцбургитов Тайгинского участка. Фото полированных поверхностей образцов пород.

Fig. 2. Distribution of enstatite nodules (*light*) in the serpentinized matrix of harzburgites from the Taiginsky area. Photo of polished surfaces of rock samples.

ся от такового у зерен оливина среди серпентинизированной матрицы гарцбургита (см. табл. 3, ан. 1–3). Те и другие обладают одинаково низкой железистостью (0.09), которая мало отличается от железистости энстатитов (0.08–0.09).

Основной объем гарцбургитов Тайгинского участка сложен серпентином. Его светло-зеленые прожилки иногда образуют прямоугольную сеть, в ячейках которой располагаются слабо просвечивающие участки (рис. 6а). В большинстве случаев прожилки (шнуры) располагаются субпараллельно (рис. 6б). По оптическим данным и химическому составу (см. табл. 3, ан. 6–8) серпентин представлен лизардитом (Варлаков, 1999).

Между шнурами и образованными ими ячейками серпентина наиболее часто встречаются прозрачные осколчатые изометричные или брусковидные блоки неизмененного оливина (см. рис. 6б, г) размером 0.1–0.3 мм. По одновременно гаснущим

реликтовым блокам установлено, что они принадлежат кристаллам оливина, размер которых редко превышает 2–3 мм (рис. 7а). Судя по линзовидной форме таких блоков (рис. 7в), кристаллы оливина подверглись динамическому воздействию. По их границам наблюдаются тонкие пластинки флогопита, а в поперечных трещинках – чешуйки талька. В отдельных образцах фрагменты зерен оливина окружены тонкими каймами магнетита. Реликтовые оливиновые зерна от серпентиновой массы нередко отделяются тонкозернистым агрегатом кальцита (см. табл. 2, ан. 25) и доломита. Первичные зерна оливина в серпентиновой матрице располагаются беспорядочно, часто не соприкасаясь. По химическому составу, низкой железистости (0.09) оливины соответствуют форстериту (см. табл. 3, ан. 1–3), содержащему 0.49–0.51 мас. % NiO. Заметные количества Ni отличают зерна оливина от редких выделений этого минерала в энстатитовых нодулях.

Рис. 3. Изометричная форма энстатитовых нодулей.
а – из Тайгинского участка, б – из Увильдинского участка.

Fig. 3. Isometric shape of enstatite nodules.
а – from the Taiginsky area, б – from the Uvildinsky area.

Рис. 4. Гигантозернистая внутренняя структура энстатитовых нодулей из гарцбургитов Увильдинского участка.

Fig. 4. Giant-grained internal structure of enstatite nodules from harzburgites of the Uvildinsky area.

Значительно реже в серпентиновой массе встречаются реликтовые блоки энстатита, которые имеют низкую интерференционную окраску и такие же размеры, как и выделения оливина (2–3 мм). Химический состав зерен энстатита из нодулей (см. табл. 2, ан. 1–5) и реликтов в цементирующей массе породы (см. табл. 3, ан. 4) практически одинаков. Энстатит обладает низкой железистостью (0.08–0.09), в нем не содержится Cr_2O_3 и NiO . Довольно часто в породе наблюдаются призматические выделения голубовато-зеленого тремолита, местами содержащие оставшиеся от замещения реликтовые участки энстатита (см. рис. 6в). По отсутствию в тремолите NiO и наличию Cr_2O_3 можно предположить, что он замещал как энстатит, так и оливин. В отличие от нодулей в основной массе гарцбургитов выделений магнезиогорнбленда и паргасита не обнаружено.

Серпентинизация в виде прожилков затронула все первичные минералы, в том числе хромшпинелиды (см. рис. 7г), а также новообразованные зерна тремолита (см. рис. 6б). Энстатитовые нодули серпентинизация затрагивает слабо. В свою очередь, в брекчированных гарцбургитах Увильдинского участка в виде пещеристых масс по серпентинизированной матрице породы развиваются сноповидные агрегаты пластинок хлорита, флогопита, скопления мелколистоватого талька. Эти минералы совместно с тонкозернистыми выделениями халцедона цементируют сохранившиеся угловатые частицы породы. Как правило, сферические энстатитовые тела при таких тектонических деформациях остаются довольно “свежими”. Из сказанного следует, что серпентинизация (лизардитизация) является поздним метаморфическим процессом, наложенным на порообразующие минералы гарцбургита (форстерит и энстатит, хромшпинелиды) и замещающий их тремолит. Мы не видим минералогических признаков метасоматического образо-

вания (см. рис. 7г), а также новообразованные зерна тремолита (см. рис. 6б). Энстатитовые нодули серпентинизация затрагивает слабо. В свою очередь, в брекчированных гарцбургитах Увильдинского участка в виде пещеристых масс по серпентинизированной матрице породы развиваются сноповидные агрегаты пластинок хлорита, флогопита, скопления мелколистоватого талька. Эти минералы совместно с тонкозернистыми выделениями халцедона цементируют сохранившиеся угловатые частицы породы. Как правило, сферические энстатитовые тела при таких тектонических деформациях остаются довольно “свежими”. Из сказанного следует, что серпентинизация (лизардитизация) является поздним метаморфическим процессом, наложенным на порообразующие минералы гарцбургита (форстерит и энстатит, хромшпинелиды) и замещающий их тремолит. Мы не видим минералогических признаков метасоматического образо-

Рис. 5. Призмы тремолита (*Tr*) вдоль плоскостей спайности энстатита (*En*) (а); границы энстатитовых нодулей с вмещающей мелкозернистой энстатит-оливин(*Ol*)-серпентиновой (*Srp*) породой (б); кристалл оливина в энстатите из нодули (в); реликтовое зерно энстатита среди вторичного агрегата кристаллов антофиллита (*Ath*) (г). Фото шлифов в проходящем свете (г) и скрещенных николях (а–в).

Fig. 5. Tremolite prisms (*Tr*) along the cleavage planes of enstatite (*En*) (a); boundaries of enstatite nodules with host fine-grained enstatite-olivine(*Ol*)-serpentine (*Srp*) rock (б); olivine crystal in enstatite from nodule (в); relict enstatite grain among secondary aggregate of anthophyllite crystals (*Ath*) (г). Photo of thin sections in transmitted light (г) and in crossed nicols (а–в).

вания оливина и энстатита по серпентиновой матрице, как это предполагается рядом исследователей (Варлаков, 1978; Ферштатер, Пушкарев, 1992; и др.). Картина получается обратной. Судя по форме реликтовых зерен в серпентинизированной матрице, их расположению, порода имела первичную равномерно мелкозернистую (гипидиоморфную) структуру с размером индивидов до 2–3 мм, характерную для гарцбургитов. На ее фоне выделяются округлые гломеропорфировые сростки кристаллов энстатита, имеющие сходство с хондрами метеоритов и фенокристаллами в лавах.

Тело нодулярных гарцбургитов располагается среди крупнозернистых темных зеленовато-серых

пород, состоящих из различно ориентированных призматических кристаллов антофиллита с совершенной спайностью (см. рис. 5г, табл. 4, ан. 1–5). Изредка среди них встречаются реликтовые прозрачные светло-зеленые зерна энстатита, занимающие менее 1% объема породы. Отдельные мелкие черные зерна принадлежат хроммагнетиту. По минеральной ассоциации и химическому составу энстатит-антофиллитовые породы являются метаморфизованными ортопироксенитами (см. табл. 1, ан. 10). Энстатит из вмещающих пород по составу близок к энстатиту из нодулярных гарцбургитов (см. табл. 2) и энстатиту из амфиболизированных оливинсодержащих ортопироксенитов Тайгинского

Таблица 2. Химический состав минералов из гломеропорфировых сростков (нодулей) из гарцбургитов Тайгинского участка Урала и вкрапленников из лавовых потоков гарцбургитов Корякского нагорья, по данным микрозондового анализа, мас. %

Table 2. Chemical composition of minerals from glomero-porphury aggregates (nodules) from harzburgites of the Taiginka area of the Urals and phenocrysts from lava flows of harzburgites of the Koryak Upland according to microprobe analyses, wt %

Компонент	En								Ol								Ol				En			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21			
SiO ₂	56.24	56.33	57.01	57.11	57.06	55.21	56.16	55.05	37.35	39.04	39.63	41.37	41.75	41.73	41.85	40.11	40.94	42.14	54.76	54.38	55.11			
TiO ₂	—	0.04	0.01	—	—	0.15	0.09	0.33	—	—	0.03	—	—	—	—	—	—	0.02	0.10	0.05	—			
Al ₂ O ₃	1.37	1.52	1.29	0.36	0.26	0.13	0.08	0.40	—	—	—	—	—	—	—	0.77	0.74	0.04	4.08	3.78	3.29			
Cr ₂ O ₃	—	—	—	—	—	0.14	0.16	0.26	0.11	—	0.03	—	—	—	—	—	—	—	0.79	0.77	0.76			
FeO*	5.14	5.66	6.35	5.59	5.68	16.02	12.32	12.41	26.66	19.02	16.66	8.88	8.68	8.56	8.51	9.16	8.71	9.53	6.06	6.10	5.67			
MnO	—	0.04	—	0.14	0.12	0.37	0.47	0.46	0.46	0.47	0.42	0.33	—	0.12	0.02	0.23	0.05	—	0.08	0.26	0.22			
MgO	36.25	35.77	36.02	36.61	36.03	26.94	30.17	29.95	34.77	41.42	43.14	49.02	49.12	49.22	49.10	49.58	49.70	46.46	33.55	33.20	33.83			
CaO	0.16	0.12	0.17	0.17	0.15	0.83	0.64	0.75	0.03	0.03	0.03	—	—	—	—	—	—	—	0.60	1.22	0.97			
Na ₂ O	0.15	—	—	0.05	0.05	0.01	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
NiO	—	—	—	—	—	0.02	—	0.09	0.11	—	0.03	0.10	0.30	0.11	0.36	—	—	—	—	—	—			
Сумма	99.31	99.48	100.85	100.03	99.35	99.83	100.09	99.70	99.49	99.98	99.97	99.70	99.85	99.74	99.84	99.83	100.14	98.19	100.02	99.76	99.85			
Формульные коэффициенты (a.p.f.u.)																								
Si	1.944	1.947	1.949	1.964	1.975	1.998	1.992	1.967	1.000	1.000	1.003	1.012	1.01	1.017	1.019	0.982	0.995	1.043	1.892	1.891	1.908			
Ti	—	0.001	0.0003	—	—	0.004	0.002	0.009	—	—	0.0006	—	—	—	—	—	—	0.0003	0.001	0.001	—			
Al	0.056	0.062	0.052	0.015	0.011	0.006	0.003	0.017	—	—	—	—	—	—	—	0.022	0.021	0.001	0.166	0.155	0.134			
Cr	—	—	—	—	—	0.004	0.004	0.007	0.002	—	0.0006	—	—	—	—	—	—	—	0.022	0.021	0.021			
Fe	0.148	0.164	0.182	0.161	0.164	0.485	0.365	0.371	0.597	0.407	0.353	0.182	0.177	0.174	0.173	0.188	0.177	0.197	0.175	0.177	0.164			
Mn	—	0.001	—	0.004	0.003	0.011	0.014	0.014	0.010	0.010	0.009	0.007	—	0.002	0.0004	0.005	0.001	—	0.002	0.008	0.006			
Mg	1.868	1.843	1.836	1.877	1.859	1.453	1.595	1.595	1.387	1.581	1.628	1.786	1.783	1.787	1.782	1.810	1.800	1.714	1.728	1.721	1.746			
Ca	0.006	0.004	0.006	0.006	0.006	0.032	0.024	0.029	0.0002	0.0002	0.0002	—	—	—	—	—	—	—	0.022	0.045	0.036			
Na	0.01	—	—	0.003	0.003	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
Ni	—	—	—	—	0.003	0.0006	—	0.03	0.002	—	0.0006	0.002	0.006	0.002	0.007	0.09	0.09	0.10	0.09	0.10	0.09			
f	0.07	0.08	0.09	0.08	0.08	0.25	0.19	0.19	0.30	0.20	0.18	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.10	0.09	0.10	0.09			

Таблицы 2. Окончание
Table 2. Ending

Компонент	Srp	Mhb	Prg	Tr	Chr-Spl								Cal	Chl	Cr-Spl			
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
SiO ₂	42.51	50.76	46.36	56.58	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	30.57	—	—	—
TiO ₂	—	0.14	0.31	—	—	—	—	—	—	—	0.71	—	—	—	—	0.08	—	1.65
Al ₂ O ₃	—	9.00	13.01	2.49	21.91	26.55	57.26	52.62	44.40	10.36	9.78	25.78	—	—	20.36	33.94	28.63	19.29
Cr ₂ O ₃	—	0.40	0.61	—	41.33	37.12	10.78	14.95	21.44	44.23	32.93	35.17	—	—	0.36	33.85	39.40	42.30
Fe ₂ O ₃ расч	—	—	—	—	5.47	4.22	0.66	0.90	1.57	15.00	24.36	8.11	—	—	—	15.83	18.10	23.25
FeO расч	—	—	—	—	23.34	23.19	12.37	13.98	18.72	26.33	27.50	22.34	—	—	—	—	—	—
FeO*	6.40	2.91	2.95	2.08	28.26	26.99	12.96	14.79	20.13	39.83	49.42	29.64	—	0.34	2.83	16.29	17.26	20.92
MnO	—	—	0.10	—	0.16	0.12	—	0.01	—	0.08	—	—	—	—	—	0.15	—	0.35
MgO	36.61	20.33	20.08	23.44	7.82	8.33	18.64	17.14	13.06	4.84	4.04	9.03	—	2.87	33.50	15.40	14.39	14.06
CaO	—	12.23	11.25	12.51	—	—	—	—	—	—	—	—	—	52.82	—	—	—	—
Na ₂ O	—	1.16	2.44	0.66	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
K ₂ O	—	0.14	0.41	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
NiO	—	—	—	—	—	—	0.14	—	0.13	—	—	—	—	—	—	—	—	—
S	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	33.89	—	—	—	—	—
Fe	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	30.96	—	—	—	—	—
Co	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.19	—	—	—	—	—
Ni	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	34.34	—	0.21	—	—	—
Сумма	85.52	97.07	97.52	99.76	100.19	99.53	99.85	99.60	99.32	100.84	99.32	100.43	99.38	56.03	87.83	99.71	99.68	98.57
Формульные коэффициенты (a.p.f.u.)																		
Si	4.102	7.038	6.472	7.706	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2.852	—	—	—
Ti	—	0.015	0.033	—	—	—	—	—	—	—	0.019	—	—	—	—	0.002	—	0.037
Al	—	1.471	2.141	0.400	0.824	0.981	1.765	1.665	1.486	0.417	0.405	0.945	—	—	2.240	1.133	0.970	0.678
Cr	—	0.044	0.067	—	1.042	0.920	0.223	0.317	0.481	1.195	0.914	0.865	—	—	0.027	0.758	0.895	0.996
Fe ³⁺	—	0.224	0.251	0.158	0.131	0.099	0.013	0.018	0.033	0.386	0.644	0.190	—	—	—	0.337	0.391	0.521
Fe ²⁺ расч	0.517	0.113	0.093	0.079	0.623	0.608	0.270	0.314	0.444	0.753	0.807	0.581	—	0.05	0.220	—	—	—
Mn	—	—	0.012	—	0.004	0.003	—	0.0004	—	0.002	—	—	—	—	—	0.004	—	0.009
Mg	5.267	4.202	4.179	4.759	0.371	0.389	0.726	0.686	0.552	0.947	0.211	0.419	—	0.07	4.659	0.650	0.616	0.624
Ca	—	1.817	1.683	1.826	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.925	—	—	—	—
Na	—	0.312	0.661	0.174	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
K	—	0.025	0.073	—	—	—	0.003	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ni	—	—	—	—	—	—	—	—	0.003	—	—	—	—	—	0.016	—	—	—
S	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4.428	—	—	—	—	—
Fe	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	8.00	—	—	—	—	—
Co	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4.196	—	—	—	—	—
f	0.09	0.07	0.08	0.05	0.67	0.64	0.28	0.33	0.46	0.82	0.87	0.65	0.024	0.42	0.04	0.34	0.38	0.45

Примечание. 1–5 – энстатиты из нодулей в гарцбургитах (наши данные); 6–8 – энстатиты из хондр в метеоритах Челябинск (Берзин и др., 2013), 7 – метеорит Яраткулова (Шарыгин, Колисниченко, 2017), 8 – метеорит Северный Колчим (Ерохин и др., 2019); 9–11 – оливины из хондр в метеоритах Урала: 9 – метеорит Челябинск (Берзин и др., 2013), 10 – метеорит Яраткулова (Шарыгин, Колисниченко, 2017), 11 – метеорит Северный Колчим (Ерохин и др., 2019); 12–15 – оливины из нодулей в гарцбургитах (наши данные); 20, 21 – аллюмохромит; 22, 23 – пикотит; 24 – хромпикотит; 25, 26 – ферриаллюмохромит; 27 – субферриаллюмохромит; 31–33 – хромшпинелиды массивных гарцбургитов из внутренней части лавовых потоков из вулканоструктуры горы Длинной на Корякском нагорье (Белый, Гельман, 1983); 31 – хромпикотит, 32, 33 – субферриаллюмохромит.

K, Co, V – не обнаружены; f – железистость (Fe/Fe + Mg); En – энстатит, Ol – оливин, Srp – серпентин, Mhb – магнезиогорнбленд, Prg – паргасит, Chl – хлорит, Pn – пентландит, Cal – кальцит, Chr-Spl – хромшпинелиды. Расчет ф. к. минералов произведен для En – на 6 атомов кислорода, для Ol, Chr-Spl, Chr, Chr-Mag – на 4, для Mhb, Prg, Tr – на 46 зарядов (Locock, 2014), для Srp, Chl – на 14, для Pn – на 8 атомов S, для Cal – на 1 катион.

* Суммарное содержание Fe.

Note. 1–5 – enstatites from nodules in harzburgites (our data); 6–8 – enstatites from chondrules in Ural meteorites: 6 – Chelyabinsk meteorite (Berzin et al., 2013), 7 – Yaratkulova meteorite (Sharygin, Kolisnichenko, 2017), 8 – Severny Kolchim meteorite (Erokhin et al., 2019); 9–11 – olivines from chondrules in Ural meteorites: 9 – Chelyabinsk meteorite (Berzin et al., 2013), 10 – Yaratkulova meteorite (Sharygin, Kolisnichenko, 2017), 11 – Severny Kolchim meteorite (Erokhin et al., 2019); 12–15 – olivines from nodules in harzburgites (our data); 20, 21 – aluminosilicates; 22, 23 – picotite; 24 – chrompicotite; 25, 26 – ferrialluminosilicates; 27 – subferrialluminosilicates; 31–33 – Cr-spinels of massive harzburgites from the inner part of lava flows from the volcano structure of Mount Dlinnaya in the Koryak Upland (Belyi and Gel'man, 1983); 31 – chrompicotite, 32, 33 – subferrialluminosilicates.

K, Co, V – not found; f – Fe content (Fe / Fe + Mg); En – enstatite, Ol – olivine, Srp – serpentine, Mhb – magnesiohornblende, Prg – pargasite, Chl – chlorite, Pn – pentlandite, Cal – calcite, Chr-Spl – chromspinelides. Calculation of *a.p.f.u.* minerals were produced for En – by 6 oxygen atoms, for Ol, Chr-Spl, Chr, Chr-Mag – by 4, for Mhb, Prg, Tr – by 46 charges (Locock, 2014), for Srp, Chl – by 14, for Pn – by 8 S atoms, for Cal – by 1 cation.

* Total Fe content.

участка (см. рис. 1, точка 2 (Кориневский и др., 2017)), в которых располагается тело уникальных шпинель-сапфириновых горнблендитов.

С помощью шпинель-оливинового (Fabries, 1979) и ортопироксенового (Brey, Kohler, 1990) геотермометров Д.Е. Савельев определил температуру равновесия оливина, хромшпинелей и энстатита, входящих в состав нодулей и цементирующей их мелкозернистой серпентинизированной матрицы (табл. 5). Значения эти оказались велики (в пределах 600–690 °C) и близкими для минералов как матрицы, так и нодулей. Это подтверждает одинаковые температурные условия образования тех и других. Е.В. Кориневский по амфиболовым геобарометрам (Hammarström, Zen E-A., 1986; Schmidt, 1991) выяснил, что первичный паргасит из нодулей образовался при давлении 6.76–6.98 кбар. Очевидно, первичный парагенезис минералов нодулей возник при таких высоких давлениях и температурах выше 600–690 °C, тогда как явно новообразованный магнезиогорнбленд из внешней каймы нодулей формировался при давлении 3.46–3.80 кбар. Видимо, таковы были условия наложенного метаморфизма и преобразования минералов матрицы. Этому соответствуют лизардитовый (а не антиго-ритовый) состав серпентинов, присутствие в матрице хроммагнетита (а не хромшпинелидов), развитие здесь тремолита, замещающего энстатит, появление пластинок флогопита и чешуек талька, хлорита, зерен карбоната. Из этого можно заключить, что первичный нодулярный гарцбургит подвергся регрессивному, а не прогрессивному метаморфизму. Это противоречит попыткам объяснить появление нодулей энстатита с хромшпинелидами и форстеритом в результате прогрессивной десерпентинизации, как это постулируется в ряде работ (Варлаков, 1978; Ферштатер, Пушкарев, 1992; и др.).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Несмотря на морфологическое сходство энстатитовых округлых обособлений (округлая форма и лучистые индивиды энстатита) в гарцбургитах Тайгинского участка, содержащих редкие выделения оливина (нодулей) с энстатитовыми хондрами из каменных метеоритов Урала, составы их главных минералов (энстатита и оливина) разнятся довольно сильно. Энстатиты из нодулей в гарцбургитах (см. табл. 2, ан. 1–5) содержат заметно меньше Ti, Cr, Fe, V, Mn, Ca, Ni и заметно больше Al, Mg, Na, нежели энстатиты из хондр в метеоритах Урала (см. табл. 2, ан. 6–8). Оливины из нодулей в гарцбургитах (см. табл. 2, ан. 12–15) содержат в 2–3 раза меньше Fe и Mn, больше Mg и Ni, чем оливины из хондр в метеоритах Урала (см. табл. 2, ан. 9–11). Следовательно, земные минералы значительно менее железисты и более магнезиальны, чем их космические аналоги.

Таблица 3. Химический состав минералов из серпентинизированной матрицы нодулярных гарцбургитов Тайгинского участка по данным микрозондового анализа, мас. %**Table 3.** Chemical composition of minerals from the serpentinized matrix of nodular harzburgites of Taiginka area according to microprobe analyse, wt %

Компонент	<i>Ol</i>			<i>En</i>	<i>Chr-Mag</i>	<i>Srp</i>			<i>Tlc</i>	<i>Tr</i>		<i>Chl</i>
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
SiO ₂	41.02	41.14	41.04	56.95	—	41.81	43.62	42.02	62.95	53.06	54.21	30.47
Al ₂ O ₃	—	—	—	0.44	2.31	—	—	—	0.63	5.20	4.72	19.15
Cr ₂ O ₃	—	—	—	—	39.91	—	—	—	—	0.37	0.39	0.78
Fe ₂ O ₃ расч					28.39							
FeO расч					28.61							
FeO*	8.77	8.83	9.01	5.36	54.16	7.46	5.22	6.05	1.57	3.37	2.92	2.53
MnO	—	0.41	0.26	0.06	0.08	0.21	0.08	—	—	—	—	—
MgO	49.67	48.53	49.04	36.37	2.57	37.50	37.80	39.05	30.91	22.43	23.67	34.22
CaO	—	—	—	0.14	—	—	—	—	—	12.78	11.28	—
Na ₂ O	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.10	1.02	—
K ₂ O	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.19	0.20	—
NiO	0.51	0.49	0.49	—	—	0.13	—	0.38	—	—	—	0.21
Сумма	99.97	99.40	99.84	99.32	99.03	87.11	87.04	87.50	96.06	98.50	98.41	87.36
Формульные коэффициенты (<i>a.p.f.u.</i>)												
Si	1.002	1.011	1.004	1.958	—	4.008	4.126	3.985	3.974	7.259	7.374	2.862
Al	—	—	—	0.018	0.098	—	—	—	0.030	0.838	0.757	2.121
Cr	—	—	—	—	1.134	—	—	—	—	0.040	0.042	0.058
Fe ³⁺ расч				0.067	0.768					0.339	0.253	
Fe ²⁺ расч	0.179	0.181	0.184	0.087	0.860	0.598	0.413	0.480	0.083	0.046	0.079	0.199
Mn	—	0.009	0.005	0.002	0.002	0.017	0.006	—	—	—	—	—
Mg	1.808	1.778	1.789	1.864	0.138	5.369	5.329	5.521	2.909	4.575	4.800	4.792
Ca	—	—	—	0.005	—	—	—	—	—	1.873	1.644	—
Na	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.292	0.269	—
K	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.033	0.035	—
Ni	0.010	0.010	0.003	—	—	0.010	—	0.029	—	—	—	0.016
f	0.09	0.09	0.09	0.08	0.92	0.10	0.07	0.08	0.03	0.08	0.06	0.04

Примечание. Ti, K, Co, V – не обнаружены; f – железистость; *Ol* – оливин, *En* – энстатит, *Chr-Mag* – хроммагнетит, *Tlc* – тальк, *Tr* – тремолит, *Srp* – серпентин, *Chl* – хлорит. Расчет ф. к. минералов произведен для *Ol*, *Chr-Mag* – на 4 атома кислорода, для *Srp*, *Chl* – на 14, для *En* – на 4, для *Tlc* – на 11, для *Tr* – на 46 зарядов (Locock, 2014).

* Суммарное содержание Fe.

Note. Ti, K, Co, V – not found; f – ferruginosity; *Ol* – olivine, *En* – enstatite, *Chr-Mag* – chrommagnetite, *Tlc* – talc, *Tr* – tremolite, *Srp* – serpentine, *Chl* – chlorite. Calculation of *a.p.f.u.* minerals were produced for *Ol*, *Chr-Mag* – by 4 oxygen atoms, for *Srp*, *Chl* – by 14, for *En* – by 4, for *Tlc* – by 11, for *Tr* – by 46 charges (Locock, 2014).

* Total Fe content.

Вопреки обычному (боуэновскому) порядку кристаллизации основных магм в нашем случае первыми начали выделяться кристаллы энстатита, как это наблюдалось и в ряде ультраосновных массивов Урала (Лапин, 2005). Овальные выделения сегрегаций энстатита уже отмечались в некоторых гипербазитовых массивах Урала (Хабарнинский, Нуралинский). В отличие от нашего случая они имели небольшие размеры (1–2 см). Их принято считать вторичными новообразованиями, возникшими при региональном кремнекислом мета-

соматозе предварительно серпентинизированных гипербазитов (Варлаков и др., 1998). Это утверждение повторяется и в других публикациях (Ферштатер, Пушкарев, 1991, 1992), но минералогических и петрографических доказательств этому не приводится. В частности, не показаны случаи развития оливина и энстатита по серпентиновой матрице породы, не доказана приуроченность овоидов энстатита к прожилкам и трещинам в породе. Как признак метасоматической природы выделений ортопироксена приводится радиально-лучи-

Рис. 6. Характер проявления вторичных изменений в гарцбургитах. Фото шлифов в проходящем (а–в) и отраженном (г) свете.

а – ячеисто-петельчатая серпентинизация (*Srp*) основной массы породы; б – реликтовые участки зерен оливина, разделенные шнурами серпентина с отдельными выделениями тремолита (*Tr*); в – в крупных кристаллах тремолита иногда сохраняются реликтовые зерна энстатита; г – скопления мелких зерен хромшпинелидов (*Chr-Spl*) в кристаллах оливина, рассеянных шнурами серпентина.

Fig. 6. The character of the manifestation of secondary alterations in harzburgites. Photo of thin sections in transmitted (a–в) and reflected (г) light.

а – cellular-loop serpentinization (*Srp*) of the bulk of the rock; б – relict areas of olivine grains separated by serpentine cords with separate segregations of tremolite (*Tr*); в – в крупных кристаллах тремолита иногда сохраняются реликтовые зерна энстатита; г – accumulations of small Cr-spinel grains (*Chr-Spl*) in olivine crystals dissected by serpentine cords.

стое строение их агрегатов. Однако эта структура характерна для роста расщепленных кристаллов в магматическом расплаве (Попов, 1984). Она проявлена в энстатитовых хондрах метеоритов (Mueller, Saxena, 1977; Chondrules..., 2019), которые никогда не подвергались серпентинизации. Естественно, не может быть и речи о вторичном образовании лучистых агрегатов энстатита в ходе десерпентинизации вещества метеоритов. Это находится в противоречии с реально наблюдаемыми протяженными дайками (более 70 м) мощностью 2–10 м гиганто-

зернистых ортопироксенитов, для которых трудно отрицать магматическое происхождение, среди линз гарцбургитов и вмещающих метаморфических сланцев в Тайгинском участке Ильменогорско-Вишневогорского комплекса (рис. 8). Радиально-лучистые кристаллы ортопироксена в них достигают в поперечнике 8–10 см. Наблюдения над морфологией границ соприкосновения крупных индивидов оливина и радиально-лучистого ортопироксена в таких телах (обнажение Гранатовая горка на северном берегу оз. Бол. Миассово) позво-

Рис. 7. Состав и строение матрикса гарцбургитов Тайгинского участка. Фото полированной поверхности образца (а) и шлифов пород (б–г).

а – оливин (*Ol*)-серпентиновая (*Srp*) масса цементирует округлые выделения энстатита (*En*); б – скопления пластинчатых кристаллов хлорита (*Chl*) и флогопита (*Phl*); в – пластинчатые выделения флогопита вдоль поверхностей спайности кристаллов оливина (*Ol*) и поперечные трещинки, заполненные чешуйками талька (*Tlc*); г – зерна хромшпинели (*Chr-Spl*), разбитые серпентиновыми жилками.

Fig. 7. Composition and structure of the harzburgite matrix of the Taiginsky area. Photo of the polished surface of the sample (a) and thin sections of rocks (б–г).

а – olivine (*Ol*)-serpentine (*Srp*) mass cements rounded enstatite (*En*) grains; б – accumulations of lamellar crystals of chlorite (*Chl*) and phlogopite (*Phl*); в – lamellar phlogopite segregations along the cleavage surfaces of olivine (*Ol*) crystals and transverse cracks filled with talc (*Tlc*) flakes; г – grains of chrome spinel (*Chr-Spl*), broken by serpentine veins.

лили В.А. Попову заявить, что эти минералы росли одновременно, а не замещали друг друга.

Порфириовидные выделения ортопироксена вообще характерны для гарцбургитов (Заварицкий, 1956; Саранчина, Шинкарев, 1967; Лапин, 2005; Магматические горные породы, 1983, 1988), но их округлые обособления встречаются действительно редко (Варлаков, 1978; Ферштатер, Пушкарев, 1991). Наш пример с нодулями в этом смысле уникален. Крупнозернистые перидотиты (С-тип) из ксенолитов в андезитовых лавах влк. Ирая на Фи-

липпинах, которые авторами описания считаются мантийными (Arai, Kida, 2000), тоже имеют порфирикластическую структуру, где ортопироксен вырастает до 1 см. Предполагается, что встречающихся совместно с ними тонкозернистые (0.1 мм) перидотиты (F-тип) возникли при метасоматозе десерпентинизированных перидотитов С-типа. Отличия в составе между энстатитами обоих типов (Al, Cr, Ca больше в первых) сходны с теми, что указаны для первичных и вторичных энстатитов в Хабаровском массиве (Ферштатер, Пушка-

Таблица 4. Микрозондовые анализы минералов из метаортопироксенитов, вмещающих тело нодулярных гарцбургитов, мас. %

Table 4. Microprobe analyses of minerals from metaorthopyroxenites containing the body of nodular harzburgites, wt %

Минерал	<i>Ath</i>	<i>Ath</i>	<i>Ath</i>	<i>Ath</i>	<i>Ath</i>	<i>Chr-Mag</i>
№ пробы	1	2	3	4	5	6
SiO ₂	60.43	59.56	58.68	59.82	60.78	–
TiO ₂	0.10	–	–	–	–	–
Al ₂ O ₃	0.58	0.43	0.49	0.54	0.43	6.65
Cr ₂ O ₃	0.15	0.18	1.28	0.28	0.30	62.75
Fe ₂ O ₃ расч						0.32
FeO расч						23.00
FeO*	5.08	4.71	4.55	5.27	5.59	23.29
MgO	31.68	30.31	31.26	32.09	29.79	6.22
CaO	0.44	0.21	0.37	0.32	–	–
ZnO						0.36
NiO	0.18	0.27	0.12	–	–	–
Na ₂ O	–	0.66	–	0.16	–	–
Сумма	98.64	96.33	96.75	98.48	96.89	99.27
Формульные коэффициенты (<i>a.p.f.u.</i>)						
Si	7.9777	8.044	7.909	7.911	8.139	–
Ti	0.01	–	–	–	–	–
Al	0.091	0.068	0.078	0.084	0.068	0.272
Cr	0.016	0.019	0.136	0.029	0.032	1.721
Fe ³⁺ расч	–	–	–	0.059		0.008
Fe ²⁺ расч	0.561	0.532	0.513	0.519	0.626	0.667
Mg	6.235	6.103	6.282	6.320	5.946	0.322
Ca	0.062	0.030	0.053	0.045		–
Ni	0.019	0.029	0.013	–		–
Zn	–	–	–	–		0.009
Na	–	0.173	–	0.041		–
f	0.08	0.08	0.08	0.08	0.09	0.68

Примечание. Mn, K, V, F, Cl, S – не обнаружены; f – железистость; *Ath* – антофиллит, *Chr-Mag* – хроммагнетит. Расчет ф. к. минералов произведен для *Chr-Mag* – на 4 атома кислорода, для *Ath* – на 46 зарядов (Locock, 2014).

* Суммарное содержание Fe.

Note. Mn, K, V, F, Cl, S was not detected. f – iron content. *Ath* – antophyllite, *Chr-Mag* – chrommagnetite. Calculation of *a.p.f.u.* were produced for *Chr-Mag* – by 4 oxygen atoms, for *Ath* – by 46 charges (Locock, 2014).

* Total Fe.

рев, 1992). Это подтверждает гипотезу о возможности возникновения вторичных *Ol* и *En* при десерпентинизации. Состав энстатита и оливина из нодулей в гарцбургитах Тайгинского участка (см. табл. 2, 3) отвечает составу “первичных” *Ol* и *En* (С-тип (Arai, Kida, 2000)) (Ферштатер, Пушкарев,

Таблица 5. Анализы минералов из нодулярных гарцбургитов, использованные для определения температур их равновесия

Table 5. Analyses of minerals from nodular harzburgites used to determine their equilibrium temperatures

Порода	Нодули				Матрица		
№ таблицы	2				3		
№ анализа	13	20	2	18	1	5	4
Минерал	<i>Ol</i>	<i>Cr-Spl</i>	<i>En</i>	<i>Prg</i>	<i>Ol</i>	<i>Cr-Mag</i>	<i>En</i>
SiO ₂	41.75	–	56.33	46.32	41.02	–	56.95
TiO ₂	–	–	0.04	0.31			–
Al ₂ O ₃	–	21.91	1.52	13.01	–	2.31	0.44
Cr ₂ O ₃	–	41.33	–	0.61	–	39.91	–
Fe ₂ O ₃ расч		5.47				28.39	
FeO расч		23.34				28.61	
FeO _{общ}	8.88	28.26	5.66	2.95	8.77	54.16	5.36
MnO	–	0.16	0.04	0.10	–	0.08	0.06
MgO	49.12	7.82	35.77	20.08	49.67	2.57	36.37
CaO			0.12	11.25			0.14
Na ₂ O			–	2.44			–
K ₂ O			–	0.41			–
NiO	0.30	–	–	–	0.51	–	–
Сумма	99.85	100.19	99.48	97.52	99.97	99.03	99.32
T 1	603 °C				617 °C		
T 2			666 °C				690 °C

Примечание. Табл. 1 – по геотермометру (Fabries, 1979), табл. 2 – по геотермометру (Brey, Kohler, 1990). Расчеты выполнены Д.Е. Савельевым.

Note. Tabl. 1 – according to the geothermometer (Fabries, 1979), tabl. 2 – according to the geothermometer (Brey, Kohler, 1990). The calculations were performed by D.E. Saveliev.

1992). Показано (Trommsdorff et al., 1998), что разложение серпентина (антигорита) на оливин и энстатит может иметь место, но при этом образуются специфические древовидные структуры оливина, чего в нашем случае не наблюдается.

Тектонические линзы серпентинизированных гипербазитов и полимиктового серпентинитового меланжа среди гнейсов, кристаллосланцев и кварцитосланцев Ильмено-Вишневогорского комплекса – явление обычное. Необычно нахождение среди них блоков разнообразных магматических пород кайнотипного облика, практически не затронутых вторичными изменениями (В.Г. Кориневский, Е.В. Кориневский, 2006, 2014; Кориневский и др., 2017). К их числу следует отнести находки сапфирин-шпинелевых горнблендитов и нодулярных гарцбургитов на Тайгинском участке, глыбы разнообразных габброидов, горнблендитов и пироксенитов на западном побережье оз. Садок в окрестностях оз. Увильды (см. рис. 8). Все упомянутые

Рис. 8. Разновидности магматических пород, встречающихся совместно в виде глыб в линзах серпентинитового меланжа в Ильмено-Вишневогорском комплексе. Фото штуфа (б) и шлифов при скрещенных николях (а, в–е).

а – сапфирин-шпинелевый горнблендит из Тайгинского участка (см. рис. 1, точка 2) (Кориневский и др., 2017); б – порфировидный амфиболовый вебстерит, Осиновый мыс на оз. Бол. Ишкуль (В.Г. Кориневский, Е.В. Кориневский, 2006); в – хегбомит-титаномангнетитовый клинопироксенит, западное побережье оз. Садок (Кориневский и др., 2016); г – магнетит-клинопироксеновое анортитовое габбро, Осиновый мыс на оз. Бол. Ишкуль (Кориневский, Кориневский, 2006); д – биотит-амфиболовое лабрадорное габбро, Осиновый мыс на оз. Бол. Ишкуль (Кориневский, Кориневский, 2006); е – амфибол-пироксеновое анортитовое габбро, западное побережье оз. Садок (В.Г. Кориневский, Е.В. Кориневский, 2014). *Hbl* – амфибол, *Cpx* – клинопироксен, *Opx* – ортопироксен, *Spl* – шпинель, *Bt* – биотит, *Pl* – плагиоклаз (анортит, лабрадор), *Mag* – магнетит, титаномангнетит, *Ep* – эпидот, *Ttn* – титанит, *Ccl* – клинохлор, *Hgb* – хегбомит.

Fig. 8. Varieties of igneous rocks occurring together in the form of blocks in lenses of serpentinite melange in the Ilmeno-Vishnevogorsky complex. Photos of the hand specimen (б) and thin sections with crossed nicols (а, в–е).

a – sapphirine-spinel hornblende from the Taiginsky area (Fig. 1, point 2) (Korinevsky et al., 2017); 6 – porphyric amphibole websterite, Osinovyy Cape on Lake Bol. Ishkul (V.G. Korinevskii, E.V. Korinevskii, 2006); в – hōgbomite-titanomagnetite clinopyroxenite, western coast of Lake Sadok (Korinevsky et al., 2016); г – magnetite-clinopyroxene anorthite gabbro, Osinovyy Cape on Lake Bol. Ishkul (Korinevsky, Korinevsky, 2006); д – biotite-amphibole labradorite gabbro, Osinovyy Cape on Lake Bol. Ishkul (Korinevskii, Korinevskii, 2006); е – amphibole-pyroxene anorthite gabbro, western coast of Lake Sadok (V.G. Korinevskii, E.V. Korinevsky, 2014). *Hbl* – amphibole, *Cpx* – clinopyroxene, *Opx* – orthopyroxene, *Spl* – spinel, *Bt* – biotite, *Pl* – plagioclase (anorthite, labradorite), *Mag* – magnetite, titanomagnetite, *Ep* – epidote, *Ttn* – titanite, *Ccl* – clinocllore, *Hgb* – hōgbomite.

породы встречены в виде редких изолированных глыб в серпентинизированной матрице. Их обнажений не встречено в окружающих толщах, поэтому можно предполагать глубинное происхождение этих пород как фрагментов пород из низов земной коры, выведенных на поверхность серпентинитовыми протрузиями (В.Г. Кориневский, Е.В. Кориневский, 2014). К таким образованиям относятся и описанные нодулярные гарцбургиты северного побережья оз. Увильды и Тайгинского участка. Затронувшие их процессы серпентинизации (лизардит, а не антигорит) служат проявлением более поздних процессов регрессивного метаморфизма. Минералогических признаков образования энстатита (в том числе в нодулях) и оливина по предшествовавшим продуктам десерпентинизации (антигоритизации (Варлаков, 1978)) в породе не наблюдается. Особенности химического состава энстатита и оливина из описанных нами гарцбургитов аналогичны таковому у этих минералов из известных тел гарцбургитов, не подверженных метаморфическим преобразованиям (Заварицкий, 1956; Магматические горные породы, 1983, 1988; Mueller, Saxena, 1977).

Химический состав описанных пород (см. табл. 1, ан. 1–4) согласно классификационным критериям (Магматические горные породы, 1983) соответствует перидотитам, а их минеральный нормативный и модальный состав (*Ol* 23–40 мол. %, *En* 36–55 мол. %) характерен для гарцбургитов. В.В. Ревердатто с соавторами (2005) поддержали разделение перидотитов (Brueckner, Medaris, 2000) на мантийные и коровые и привели геохимические критерии для мантийных перидотитов: *MgO* – 26–49 %, *Cr* > 900 г/т, пониженные количества *FeO* – 7.0–13.5 мас. %, *TiO₂* < 0.4 мас. %, *Sm* < 0.5 г/т, *La* и *Yb* < 1.2 г/т, сумма *P3Э* < 10 г/т. Всем этим условиям отвечают описанные нодулярные серпентинизированные гарцбургиты северного побережья оз. Увильды. С ними ассоциируют меридиональные дайки гигантозернистых ортопироксенитов мощностью 1–10 м и протяженностью до 70 м (рис. 9). Они занимают секущее положение по отношению к перидотитам и окружающим гранат-биотитовым кристаллосланцам, что доказывает их более позднее внедрение. О подобной ситуации с дайками гигантозернистых ортопироксенитов сообщается в работе о Дзидинской зоне палеозойд южного обрамления Сибирской платформы (Горнова, 2011). Считается, что мантийные (абис-

сальные) перидотиты, залегающие в фундаменте островных дуг, пересекаются транспортными каналами просачивания новообразованного расплава ортопироксенитового состава. Вероятно, и подобные южно-уральские дайки по времени становления очень оторваны от располагающихся рядом мантийных перидотитов и принадлежат уже к поздним островодужным образованиям.

По содержаниям *Sr*, *Ba*, *Rb* гарцбургиты Тайгинки близки к гарцбургитам Войкарского массива (Сначев и др., 2001, с. 155). Распределение в них *P3Э*, нормированных по хондриту (Sun, 1982) (табл. 6, рис. 10), носит U-образный характер, что типично для гипербазитов зоны Главного Уральского разлома. Выявленная *Eu*-аномалия аналогична таковой некоторых гарцбургитов Нуралинского (см. рис. 10, кривая 3) и Хабаровинского (см. рис. 10, кривая 8) массивов. В других пробах уральских гарцбургитов такая аномалия не отмечена. В целом содержания и распределение *P3Э* в нодулярных гарцбургитах укладываются в пределы колебаний *P3Э* в остальных гарцбургитах Урала.

Приведенные нами петрографические наблюдения свидетельствуют в пользу существования магматического расплава ультраосновного состава. Они подтверждают заключение А.А. Маракушева (1994) о том, что интрузии дунит-гарцбургитовой формации образуются при кристаллизации расплава, отделившегося от мантийного субстрата при полном его плавлении. Этим автором подчеркивается особая роль при этом процессов ликвации. Об этом говорится и в работе (Hatch et al., 1972), где описаны трубчатые тела и дайки дунитов, пересекающие горизонты расслоенного Бушвельдского лополита. По мнению этих авторов, все структурные признаки указывают на то, что данные породы образовались в результате прямой кристаллизации из расплава. Ксенолиты ультрамафитов в базальтоидах островных дуг содержат минералы (шпинели, клинопироксены), в которых имеются первичные расплавные включения. Это также доказывает магматическое (расплавное) происхождение вмещающих их пород.

Яркий пример справедливости мнения о существовании расплавов гарцбургитового состава привели в давней работе В.Ф. Белый и М.Л. Гельман (1983). В изометричной вулканоструктуре поперечником около 10 км горы Длинной на Корякском нагорье (п-ов Валижген) среди терригенных слабо деформированных пород верхнего мела они описа-

Рис. 9. Гигантозернистая структура дайки энстатитов среди гранат-биотитовых гнейсов в 3.5 км северо-западнее пос. Тайгинка. Координаты южного выхода – 55°38'46.8" с. ш., 60°29'14.9" в. д., северного – 55°38'48.4" с. ш., 60°29'16.2" в. д. Фото В.М. Лежнева.

Fig. 9. Giant-grained structure of enstatite dyke among garnet-biotite gneisses in 3.5 km to northwest of Taiginka. The coordinates of the southern outcrop are 55°38'46.8" N, 60°29'14.9" E, the north – 55°38'48.4" N, 60°29'16.2" E. Photo by V.M. Lezhnev.

Таблица 6. Содержание редкоземельных элементов в некоторых гарцбургитах Урала, г/т

Table 6. REE in some harzburgites of the Urals, ppm

№	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE
1	0.64	0.75	0.1	0.37	0.09	0.02	0.13	0.02	0.13	0.03	0.1	0.02	0.18	0.03	2.61
2	0.63	1.13	0.13	0.56	0.09	0.06	0.22	0.04	0.23	0.06	0.18	0.03	0.21	0.04	3.61
3	0.02	0.05	0.01	0.07	0.03	0.01	0.06	0.01	0.07	0.02	0.05	0.01	0.05	0.01	0.47
4	0.08	0.15	0.02	0.10	0.02	0.01	0.03	0.004	0.04	0.01	0.03	0.004	0.04	0.01	0.58
5	0.06	0.14	0.02	0.08	0.02	0.04	0.03	0.01	0.04	0.01	0.02	0.004	0.03	0.005	0.51
6	0.002	0.01	0.001	0.01	0.003	0.002	0.01	0.003	0.03	0.01	0.04	0.01	0.05	0.01	0.19
7	0.01	0.03	0.01	0.03	0.01	0.005	0.02	0.005	0.04	0.01	0.04	0.01	0.07	0.01	0.30
8	0.04	0.13	0.02	0.11	0.04	0.01	0.06	0.02	0.14	0.04	0.10	0.02	0.12	0.02	0.87

Примечание. 1 – нодулярный гарцбургит Тайгинского участка (наши данные); 2 – гарцбургит массива Южный Крака (Сначев и др., 2001); 3 – гарцбургит Нуралинского массива (Spadea et al., 2003); 4, 5 – гарцбургиты Миндякского массива (Spadea et al., 2003); 6 – гарцбургит Войкарского массива (Sharma et al., 1995); 7, 8 – гарцбургиты Хабаровинского массива (Пушкарев, 1998).

Note. 1 – nodular harzburgite of the Taiginka area (our data); 2 – harzburgite from the South Kraka massif (Snachev et al., 2001); 3 – harzburgite of the Nuralinsky massif (Spadea et al., 2003); 4, 5 – harzburgites of the Mindyak massif (Spadea et al., 2003); 6 – harzburgite of the Voikar massif (Sharma et al., 1995); 7, 8 – harzburgites of the Khabarnyi massif (Pushkarev, 1998).

ли согласные лавовые потоки и рвущие экструзивные тела гарцбургитового состава. Лавовые потоки гарцбургитов имеют массивную сердцевину и лавобрекчиевую оторочку в кровле, подошве и на выклинке. Мощности таких потоков находятся в

пределах 2.5–15.0 м. Наиболее характерной структурой для них является порфировая, при которой вкрапленники оливина и ортопироксена имеют поперечник до 1–3 мм и цементируются более тонкозернистым серпентинизированным агрегатом этих

Рис. 10. Диаграмма распределения РЗЭ в гарцбургитах Урала (по данным табл. 5).

Fig. 10. Diagram of REE distribution in harzburgites of the Urals (according to Table 5).

же минералов. Эти данные являются неоспоримым доказательством существования расплава гарцбургитового состава, сложенного кристаллами оливина (до 50% объема), ортопироксена (15–25%), а также хромшпинелей (до 1%) и клинопироксена (до 3%). Породы серпентинизированы, но первоначальная форма кристаллов сохраняется. Они образуют гломеропорфировые сростки до 3 мм в поперечнике, довольно равномерно распределенные в мелкозернистой основной массе породы. В сростках участвуют кристаллы оливина (форстерита), ортопироксена (энстатита), клинопироксена (диопсида) и хромшпинелидов. Состав пород и минералов был проанализирован современными методами, в том числе на микрозонде. Для сравнения наряду с нашими породами и минералами мы привели (см. табл. 1, 2) часть анализов из цитированной работы (Белый, Гельман, 1983). Из сравнения следует вывод о полной аналогии составов упомянутых пород Корякского нагорья и нодулярных гарцбургитов Южного Урала. Те и другие по составу не отличаются от гарцбургитов складчатых поясов (Магматические горные породы, 1988), обладая низкой железистостью и тем же набором хромшпинелидов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На северном побережье южно-уральского оз. Увильды в последние годы среди линз серпентинитового меланжа выявлены крупные выходы амфиболитизированных ортопироксенитов. Участками они содержат тела редких разновидностей ультраосновных пород: описанных ранее (Кориневский и др., 2017) сапфирин-шпинелевых горнблендитов и недав-

но обнаруженных нодулярных ультрабазитов. Последние обладают необычной структурой – хондровой, аналогичной той, что характерна для каменных метеоритов (Левин, 1965). Огромные, по сравнению с метеоритными, изометричные образования диаметром 2–7 см сложены скоплениями очень крупных кристаллов энстатита, частично замещенных тремолитом, тальком, флогопитом, хлоритом. По морфологии и составу эти сферические тела (нодулы) подобны радиальным энстатитовым хондрам метеоритов (Mueller, Saxena, 1977). Описаний подобных структур в зарубежной литературе по ультраосновным породам Земли неизвестно (Wolff, 1978; Paktunç, 1984; Johnson et al., 2004; Магматические горные породы, 1988). На Урале они лишь упоминаются (Варлаков, 1978; Ферштатер, Пушкарев, 1991; Лапин, 2005).

Цементирует нодулы серпентинизированная мелкозернистая масса, содержащая многочисленные реликтовые блоки форстерита и в меньшем количестве – энстатита, а также кристаллы вторичного тремолита. В нодулях чаще, чем тремолит, развит магнезиогорнбленд, а встречающиеся иногда кристаллы паргасита можно отнести к первичным минералам. Между зернами энстатита, оливина и внутри них неравномерно распределена редкая мелкая вкрапленность характерных для перидотитов хромшпинелидов и пентландита. Взаимоотношения кристаллов энстатита из нодул с окружающих их цементирующей массой свидетельствуют о сходстве условий их кристаллизации с таковыми для гломеропорфировых сростков в разнообразных магматических породах (Заварицкий, 1956; Саранчина, Шинкарев, 1967; Белый, Гельман, 1983; Магматические горные породы, 1983, 1988; Лапин, 2005).

Наши данные являются новым доказательством правоты представлений о существовании расплавов ультраосновного состава (Hatch et al., 1972; Белый, Гельман, 1983; Магматические горные породы, 1983, 1988; Маракушев, 1994), кристаллизация которых в земной коре приводит к появлению интрузивных масс перидотитов и дунитов, к излияниям меймечитов, пикритов, коматиитов, гарцбургитовых лав. Видимо, эта точка зрения должна быть равноправной с существующими гипотезами (Bowen, 1928; Bowen, Tuttle, 1949; Ringwood, 1975) о внедрении ультрамафитов в земную кору в виде горячего диапира “кристаллической каши” или в результате застывания отделившегося кумулата при дифференциации очагов базальтовой магмы (Wager, Brown, 1968).

Описанные экзатитовые нодулы можно считать фенокристаллами и гломеропорфировыми сростками в родоначальной гарцбургитовой магме. Доказательств их вторичной природы (метасоматического образования при десерпентинизации гарцбургитов) не обнаружено.

Благодарности

Автор признателен В.М. Лежневу за обнаружение выходов уникальных пород и помощь в отборе образцов. Эта работа не была бы осуществлена без активного содействия и помощи С.В. Колисниченко. Особая благодарность специалисту по ультрамафитам Д.Е. Савельеву за ценные советы, расчеты температур равновесия минералов, информационную помощь. Благодарю за исследования коллег по Институту минералогии УрО РАН: В.А. Котлярова, К.А. Филиппову и М.С. Свиренко, а Е.В. Кориневского – за помощь в подготовке иллюстраций, расчеты давлений по геобарометрам. Автор благодарен рецензенту за замечания по оформлению рукописи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белый В.Ф., Гельман М.Л. (1983) Ультраосновные изверженные породы в юго-западной части Корякского нагорья. *Мантийные ксенолиты и проблема ультраосновных магм*. Новосибирск: Наука, 138-149.
- Берзин С.В., Ерохин Ю.В., Иванов К.С., Хиллер В.В. (2013) Особенности минерального и геохимического состава метеорита “Челябинск”. *Литосфера*, (3), 106-117.
- Варлаков А.С. (1978) Петрография, петрохимия и геохимия гипербазитов Оренбургского Урала. М.: Наука, 239 с.
- Варлаков А.С. (1999) Серпентины ультраосновных пород Урала. *Урал. минер. сборник № 9*. Миасс: ИМин УрО РАН, 78-101.
- Варлаков А.С., Кузнецов Г.П., Кораблев Г.Г., Муркин В.П. (1998) Гипербазиты Вишневогорско-Ильменогорского метаморфического комплекса (Южный Урал). Миасс: УрО РАН, 195 с.
- Горнова М.А. (2011) Геохимия и петрология надсубдукционных перидотитов. Автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. Иркутск: Ин-т геохимии СО РАН, 42 с.
- Ерохин Ю.В., Коротев В.А., Хиллер В.В., Иванов К.С., Захаров А.В. (2019) Вещественный состав метеорита Северный Колчим. *Вестн. Перм. ун-та. Геология*, **18**(3), 194-204.
- Заварицкий А.Н. (1956) Изверженные горные породы. М.: АН СССР, 479 с.
- Кориневский В.Г., Кориневский Е.В. (2006) Новое в геологии, петрографии и минералогии Ильменских гор. Миасс: ИМин УрО РАН, 102 с.
- Кориневский В.Г., Кориневский Е.В. (2014) Фрагменты пород основания земной коры в структуре Ильмено-Вишневогорского комплекса. *Урал. геол. журн.*, (1), 68-72.
- Кориневский В.Г., Кориневский Е.В., Котляров В.А., Лебедева С.М., Блинов И.А., Миронов А.Б., Штенберг М.В. (2017) Сапфирин-шпинелевые горнблэндиты Ильмено-Вишневогорского комплекса. *Литосфера*, (1), 68-95.
- Кориневский В.Г., Котляров В.А., Кориневский Е.В., Миронов А.Б., Штенберг М.В. (2016) Магнезиохёгбмит $(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+}, \text{Zn})_8(\text{Al}, \text{Ti}, \text{Fe}^{3+})_{20}\text{O}_{38}(\text{OH})_2$ из Ильмено-Вишневогорского комплекса. *Минералогия*, (2), 20-33.
- Лапин Б.Н. (2005) Атлас структур ультраосновных пород Урала. Новосибирск, Изд-во СО РАН, филиал “ГЕО”, 184 с.
- Левин Б.Ю. (1965) Происхождение метеоритов. *Успехи физ. наук*, **86**(1), 41-67.
- Магматические горные породы. В 6 т. Гл. ред. О.А. Богатиков. Т. 1. Классификация, номенклатура, петрография (1983). М.: Наука, 367 с.
- Магматические горные породы. В 6 т. Гл. ред. О.А. Богатиков. Т. 5. Ультраосновные породы (1988). М.: Наука, 508 с.
- Маракушев А.А. (1994) Положение платиновых металлов в системе экстремальных состояний элементов и формационные типы их месторождений. *Платина России*. М.: Геоинформмарк, 206-229.
- Павлов Н.В., Григорьева И.И., Гришина Н.В. (1979) Образование и генетические типы хромитовых месторождений геосинклинальных областей. *Условия образования магматических рудных месторождений*. М.: Наука, 65-79.
- Петрографический словарь (1981). Под ред. В.П. Петрова. М.: Недра, 496 с.
- Попов В.А. (1984) Практическая кристалломорфология минералов. Свердловск: УНЦ АН СССР, 191 с.
- Пушкарев Е.В. (1998) Источенные лепролиты Хабарнинского массива на Южном Урале. *Ежегодник-1997 ИГиГ УрО РАН*. Екатеринбург: УрО РАН, 109-111.
- Реведаatto В.В., Селятицкий А.Ю., Ремизов Д.Н., Хлестов В.В. (2005) Геохимические различия “мантийных” и “коровых” перидотитов и пироксенитов высоких/сверхвысоких давлений. *Докл. РАН*, **400**(1), 93-97.
- Рязанцев А.В., Разумовский А.А., Кузнецов Н.Б., Калинина Е.А., Дубинина С.В., Аристов В.А. (2007) Геодинамическая природа серпентинитовых меланжей на Южном Урале. *Бюлл. МОИП. Отд. геол.*, **82**(1), 32-47.
- Саранчина Г.М., Шинкарев Н.Ф. (1967) Петрография магматических и метаморфических пород. Л.: Недра, 324 с.
- Сначев В.И., Савельев Д.Е., Рыкус М.В. (2001) Петрогеохимические особенности пород и руд габбро-гипербазитовых массивов Крака. Уфа: ДизайнПресс, 212 с.
- Ферштатер Г.Б., Пушкарев Е.В. (1991) Дунит-клинопироксенит-габбровая формация Хабарнинского массива. *Петрология постгарцбургитовых интрузивов Кемпирсайско-Хабарнинской офиолитовой ассоциации*

- (Южный Урал). Свердловск: УрО АН СССР, 81-160.
- Ферштатер Г.Б., Пушкарёв Е.В. (1992) Новый тип платиноидной минерализации в офиолитах Урала. *Ежегодник-1991*. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 117-120.
- Шарыгин В.В., Колисниченко С.В. (2017) Яраткулова – новый H-хондрит на Урале: минералогические данные. *Минералогия*, (1), 1-15.
- Arai S., Kida M. (2000) Origin of fine-grained peridotite xenoliths from Iraya volcano of Batan island, Philippines: deserpentinization or metasomatism at the wedge mantle beneath an incipient arc? *The Island Arc*, (9), 458-471.
- Bowen N.L. (1928) The evolution of the igneous rocks. Princeton. N. Y., Princeton University Press, 332 p.
- Bowen N.L., Tuttle O.F. (1949) MgO–SiO₂–H₂O. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **60**, 439-460.
- Brueckner H.K., Medaris L.G. (2000) A general model for the intrusion and evolution of “mantle” garnet peridotites in high-pressure and ultrahigh-pressure metamorphic terranes. *J. Metamorph. Geol.*, **18**, 123-133.
- Chondrules: Records of Protoplanetary Disk Processes (2019). Ed. by S.S. Russell, H.C. Connolly Jr., A.N. Krot. Cambridge, Cambridge University Press, 450 p.
- Fabries J. (1979) Spinel-olivine geothermometry in peridotites from ultramafic complexes. *Contrib. Miner. Petrol.*, **69**(4), 329-336. DOI: 10.1007/BF00372258
- Hammarström J.M., Zen E.-A. (1986) Aluminium in hornblende: an empirical igneous geobarometer. *Amer. Miner.*, **71**(11/12), 1297-1313.
- Hatch F.N., Wells A.K., Wells M.K. (1972) Petrology of the igneous rocks. L., Thomas Murby & Co, 512 p.
- Hawthorne F.C., Oberti R., Harlow G.E., Maresch W.V., Martin R.F., Schumacher J.C., Welch M.D. (2012) Nomenclature of the amphibole supergroup. *Amer. Miner.*, **97**, 2031-2048.
- Johnson K.I., Brady J.B., MacFalan W.A., Thomas R.B., Poulsen C.J., Sincok M.J. (2004) Precambrian meta-ultramafic rocks from the Tobacco Root Mountains, Montana. *Spec. Pap.*, **377**. *Geol. Soc. Amer., Montana, Boulder, Colorado*, 71-87.
- Locock A.J. (2014) An Excel spreadsheet to classify chemical analyses of amphiboles following the IMA 2012 recommendations. *Comp. Geosci.*, **62**, 1-11.
- Mueller R.F., Saxena S.K. (1977) Chemical petrology. Springer-Verlag, N.Y.; Heidelberg; Berlin, 394 p.
- Paktunç A.D. (1984) Metamorphism of the ultramafic rocks of the Thompson mine, Thompson nickel belt, Northern Manitoba. *Canad. Miner.*, **22**, 77-91.
- Ringwood A.E. (1975) Composition and petrology of the Earth's mantle. N. Y., McGraw-Hill, 618 p.
- Roduit N. (2014) JMicroVision, Image analysis toolbox for measuring and quantifying components of high-definition images. Version 2.7. URL: <http://www.jmicrovision.com>.
- Schmidt M.W. (1991) Experimental calibration of the Al-in-hornblende geobarometer at 650 °C, 3.5–13.0 kbar. *Terra Abstr.*, **3**(1), 30.
- Sharma M., Wasserburg G.J., Papanastassiou D.F.A., Quick J.E., Sharkov E.V., Laz'ko E.E. (1995) High ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd in extremely depleted mantle rocks. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **135**, 101-114.
- Spadea P., Zanetti A., Vannucci R. (2003) Mineral chemistry of ultramafic massifs in the Southern Uralides orogenic belt (Russia) and the petrogenesis of the Lower Palaeozoic ophiolites of the Uralian Ocean. *Ophiol. Earth Hist. Spec. Publ.* **218**. *Lond., Geol. Soc.*, 567-596.
- Sun S.S. (1982) Chemical composition and origin of the Earth's primitive mantle. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **46**, 179-192.
- Trommsdorff V., López Sánchez-Vizcaino V., Cómez-Pugnaire M.T., Müntener O. (1998) High pressure breakdown of antigorite to spinifex-textured olivine and orthopyroxene, SE Spaine. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **132**, 139-148.
- Wager L.P., Brown G.M. (1968) Layered igneous rocks. Edinburg; London, Oliver & Boyd, 588 p.
- Whitney D.L., Evans B.W. (2010) Abbreviations for names of rock-forming minerals. *Amer. Miner.*, **95**, 185-187.
- Wolff R.A. (1978) Ultramafic lenses in the Middle Ordovician Partridge formation, Bronson Hill anticlinorium, Central Massachusetts. *Contribution No. 34. Department of Geology and Geography, University of Massachusetts, Amherst, Massachusetts*, 165 p.

REFERENCES

- Hammarström J.M., Zen E.-A. (1986) Aluminium in hornblende: an empirical igneous geobarometer. *Amer. Miner.*, **71**(11/12), 1297-1313.
- Hatch F.N., Wells A.K., Wells M.K. (1972) Petrology of the igneous rocks. L., Thomas Murby & Co, 512 p.
- Hawthorne F.C., Oberti R., Harlow G.E., Maresch W.V., Martin R.F., Schumacher J.C., Welch M.D. (2012) Nomenclature of the amphibole supergroup. *Amer. Miner.*, **97**, 2031-2048.
- Igneous rocks. Ed. by O.A. Bogatkov. V. 1. Classification, nomenclature, petrography (1983). Moscow, Nauka Publ., 367 p. (In Russian)
- Igneous rocks. Ed. by O.A. Bogatkov. V. 5. Ultrabasic rocks (1988). Moscow, Nauka Publ., 508 p. (In Russian)
- Johnson K.I., Brady J.B., MacFalcon W.A., Thomas R.B., Poulsen C.J., Sincock M.J. (2004) Precambrian meta-ultramafic rocks from the Tobacco Root Mountains, Montana. *Spec. Pap. 377. Geol. Soc. Amer., Montana, Boulder, Colorado*, 71-87.
- Korinevsky V.G., Korinevsky E.V. (2006) The new in geology, petrography and mineralogy of the Ilmeny Mountains. Miass, IMin UrO RAN Publ., 102 p. (In Russian)
- Korinevsky V.G., Korinevsky E.V. (2014) Fragments of rocks of the bottom of earth's crust in the structure of the Ilmeno-Vishnevogorsky complex. *Ural. Geol. Zhurn.*, (1), 68-72. (In Russian)
- Korinevsky V.G., Korinevsky E.V., Kotlyarov V.A., Lebedeva S.M., Blinov I.A., Mironov A.B., Shtenberg M.V. (2017) Sapphirine-spinel hornblendites of the Ilmeno-Vishnevogorsky complex. *Lithosfera*, (1), 68-95. (In Russian)
- Korinevsky V.G., Kotlyarov V.A., Korinevsky E.V., Mironov A.B., Shtenberg M.V. (2016) Magnesiohögbohmite $(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+}, \text{Zn})_8(\text{Al}, \text{Ti}, \text{Fe}^{3+})_{20}\text{O}_{38}(\text{OH})_2$ from the Ilmeno-Vishnevogorsky complex. *Mineralogiya*, (2), 20-33. (In Russian)
- Lapin B.N. (2005) Atlas of structures of ultrabasic rocks of the Urals. Novosibirsk, GEO Publ., 184 p. (In Russian)
- Levin B.Yu. (1965) The origin of meteorites. *Uspekhi Fizicheskoi Nauki*, **86**(1), 41-67. (In Russian)
- Locock A.J. (2014) An Excel spreadsheet to classify chemical analyses of amphiboles following the IMA 2012 recommendations. *Comp. Geosci.*, **62**, 1-11.
- Marakushev A.A. (1994) The position of platinum metals in the system of extreme states of elements and the formation types of their deposits. *Platinum of Russia*. Moscow, Geoinformmark Publ., 206-229. (In Russian)
- Mueller R.F., Saxena S.K. (1977) Chemical petrology. Springer-Verlag. N.Y.; Heidelberg; Berlin, 394 p.
- Paktunç A.D. (1984) Metamorphism of the ultramafic rocks of the Thompson mine, Thompson nickel belt, Northern Manitoba. *Canad. Miner.*, **22**, 77-91.
- Pavlov N.V., Grigorieva I.I., Grishina N.V. (1979) Formation and genetic types of chromite deposits in geosynclinal regions. *Formation conditions for magmatic ore deposits*. Moscow, Nauka Publ., 65-79. (In Russian)
- Petrographic dictionary (1981). Ed. by V.P. Petrov. Moscow, Nedra Publ., 496 p. (In Russian)
- Popov V.A. (1984) Applied crystallography of minerals. Sverdlovsk, UNTs AN SSSR Publ., 191 p. (in Russian)
- Pushkarev E.V. (1998) Depleted Iherzolites of the Khabarnsky massif in the Southern Urals. *Ezhgodnik-1997 IGG UrO RAN*. Yekaterinburg, UrO RAN Publ., 109-111. (In Russian)
- Reverdatto V.V., Selyatitskii A.Yu., Remizov D.N., Khlestov V.V. (2005) Geochemical differences between "mantle" and "crustal" peridotites and high / ultrahigh pressure pyroxenites. *Dokl. RAN*, **400**(1), 93-97. (In Russian)
- Ringwood A.E. (1975) Composition and petrology of the Earth's mantle. N. Y., McGraw-Hill, 618 p.
- Roduit N. (2014) JMicroVision, Image analysis toolbox for measuring and quantifying components of high-definition images. Version 2.7. URL: <http://www.jmicrovision.com>.
- Ryazantsev A.V., Razumovskii A.A., Kuznetsov N.B., Kalinina E.A., Dubinina S.V., Aristov V.A. (2007) Geodynamic nature of serpentinite melange in the Southern Urals. *Byull. MOIP, Geol.*, **82**(1), 32-47. (In Russian)
- Saranchina G.M., Shinkarev N.F. (1967) Petrography of igneous and metamorphic rocks. L., Nedra Publ., 324 p. (In Russian)
- Schmidt M.W. (1991) Experimental calibration of the Al-in-hornblende geobarometer at 650 °C, 3.5–13.0 kbar. *Terra Abstr.*, **3**(1), 30.
- Sharma M., Wasserburg G.J., Papanastassiou D.F.A., Quick J.E., Sharkov E.V., Laz'ko E.E. (1995) High $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ in extremely depleted mantle rocks. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **135**, 101-114.
- Sharygin V.V., Kolisnichenko S.V. (2017) Yaratkulova – new H-chondrite in the Urals: mineralogical data. *Mineralogiya*, (1), 1-15. (In Russian)
- Snachev V.I., Savell'iev D.E., Rykus M.V. (2001) Petrogeochemical features of rocks and ores of gabbro-hyperbasite massifs of Kraka. Ufa, DesignPress Publ., 212 p. (In Russian)
- Spadea P., Zanetti A., Vannucci R. (2003) Mineral chemistry of ultramafic massifs in the Southern Uralides orogenic belt (Russia) and the petrogenesis of the Lower Palaeozoic ophiolites of the Uralian Ocean. *Ophiol. Earth Hist. Spec. Publ.* **218. Lond., Geol. Soc.**, 567-596.
- Sun S.S. (1982) Chemical composition and origin of the Earth's primitive mantle. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **46**, 179-192.
- Trommsdorff V., López Sánchez-Vizcaino V., Cómez-Pugnaire M.T., Müntener O. (1998) High pressure breakdown of antigorite to spinifex-textured olivine and orthopyroxene, SE Spaine. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **132**, 139-148.
- Varlakov A.S. (1978) Petrography, petrochemistry and geochemistry of hyperbasites of the Orenburg Urals. Moscow, Nauka Publ., 239 p. (In Russian)
- Varlakov A.S. (1999) Serpentinized ultrabasic rocks of the Urals. *Ural. Mineral. Sbornik No. 9*. Miass, IMin UrO RAN Publ., 78-101. (In Russian)
- Varlakov A.S., Kuznetsov G.P., Korablev G.G., Murkin V.P. (1998) Hyperbasites of the Vishnevogorsk-Ilmenogorsky metamorphic complex (South Urals). Miass, UrO RAN Publ., 195 p. (In Russian)
- Wager L.P., Brown G.M. (1968) Layered igneous rocks. Edinburg; L., Oliver & Boyd, 588 p.
- Whitney D.L., Evans B.W. (2010) Abbreviations for names of rock-forming minerals. *Amer. Miner.*, **95**, 185-187.
- Wolff R.A. (1978) Ultramafic lenses in the Middle Ordovician Partridge formation, Bronson Hill anticlinorium, Central Massachusetts. *Contribution no. 34. Department of Geology and Geography, University of Massachusetts, Amherst, Massachusetts*, 165 p.
- Zavaritsky A.N. (1956) Eruptive rocks. Moscow, AN SSSR Publ., 479 p. (In Russian)