# **———** ПЕТРОЛОГИЯ **———**

УДК 550.4:552.11(470.5)

# ОРБИКУЛЯРНЫЕ ПЕРИДОТИТЫ ПОЛЯРНОГО УРАЛА: НОВЫЕ СВИДЕТЕЛЬСТВА МАГМАТИЧЕСКОЙ ИМПРЕГНАЦИИ В ОФИОЛИТАХ

© 2021 г. В. Р. Шмелев<sup>1, \*</sup>, В. Г. Котельников<sup>2</sup>, М. В. Червяковская<sup>1</sup>

Представлено академиком РАН Н.С. Бортниковым 28.12.2020 г. Поступило 28.12.2020 г. После доработки 26.01.2021 г. Принято к публикации 01.02.2021 г.

В офиолитах Войкарского массива (Полярный Урал) установлены перидотиты необычного орбикулярного строения, отнесенные к импрегнированному типу образований. Орбикулы этих пород сложены вторичным клинохлор-диопсидовым агрегатом, содержащим зерна первичного клинопироксена и паргасита. Морфология и состав орбикул позволяют относить их к сегрегациям (глобулам) расплава в оливиновой матрице перидотитов, испытавшим частичную кристаллизацию *in situ*. Согласно результатам геохимического моделирования, эти расплавы имели переходные к бонинитам характеристики, отвечающие надсубдукционным условиям. Формирование орбикулярных перидотитов было сопряжено с процессом блокировки межзерновых каналов миграции просачивающихся базальтоидных расплавов.

*Ключевые слова:* офиолиты, Войкарский массив, дуниты, орбикулярные структуры, импрегнация, "замороженные" расплавы

**DOI:** 10.31857/S2686739721050182

Горные породы с экзотической орбикулярной текстурой могут иметь различное происхождение, обусловленное неравновесной кристаллизацией и смешением расплавов, диффузией, реакционным взаимодействием и другими причинами [1]. Среди ультраосновных пород офиолитовых комплексов хорошо известны орбикулярные (нодулярные) дуниты и хромититы, образование которых соотносится с воздействием на мантийные перидотиты просачивающихся бонинитовых расплавов [2]. В офиолитах Полярного Урала [3, 4], наряду с ними, впервые было установлено присутствие отличных по составу и строению пород, названных орбикулярными перилотитами. Их летальное петрологическое изучение свидетельствует о первично магматической природе этих образований.

Орбикулярные перидотиты были обнаружены В.Г. Котельниковым в Войкарском офиолитовом массиве, в зоне контакта мантийных перидотитов с хромититами Кэршорского проявления и пород расслоенного клинопироксенит-габбрового комплекса (рис. 1). Более детальное изучение позво-

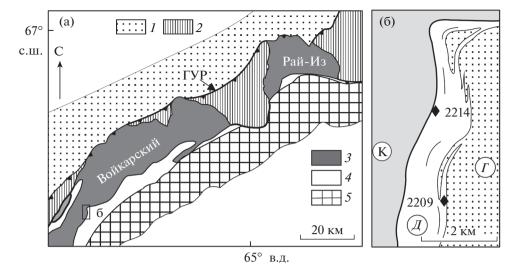
Вмещающие дуниты имеют гипидиоморфнозернистую структуру, образованную агрегатом крупных зерен оливина и акцессорного хромшпинелида. С появлением ксеноморфно-таблитчатых зерен (шлиров) клинопироксена и/или плагиоклаза они переходят в диопсидсодержащие дуниты и плагиоперидотиты без изменения структуры оливиновой матрицы. По плагиоклазу псевдоморфно развивается соссюрит; его замещения хлоритом [5, 6] с образованием зональных агрегатов не установлено. Орбикулярные перидотиты подобны вмещающим дунитам, отличаясь присутствием многочисленных (до 10-30% объема породы) небольших (0.5-3 мм) округлых, эллипсовидных и ксеноморфных обособлений орбикул (глобул) зонального строения, сложенных преимущественно вторичными минералами. В зависимости от положения в разрезе они характеризуются следующими особенностями строения.

лило установить, что эти породы образуют маломощные (первые метры?) прослои и шлирообразные обособления в дунитах, находящихся в основании расслоенного комплекса. Совместно с ними в разрезе присутствуют жило- и пластообразные тела плагиоперидотитов и троктолитов полосчатого и такситового строения. Ориентировка шлировидности в этих породах преимущественно конформна контакту с мантийными перидотитами.

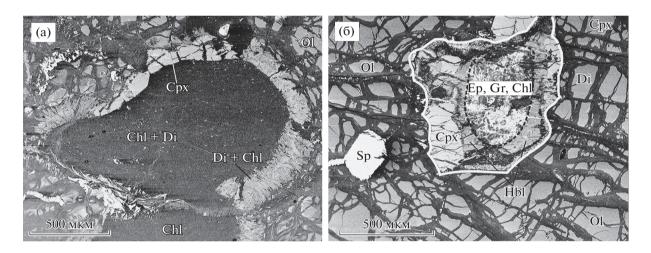
<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Институт геологии и геохимии Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского (ВСЕГЕИ), Санкт-Петербург, Россия

<sup>\*</sup>E-mail: shmelev@igg.uran.ru



**Рис. 1.** Тектоническая схема офиолитовых массивов Полярного Урала (а) и фрагмент строения зоны контакта мантийных перидотитов и габбро Войкарского массива (б). а: I — палеозойские осадочные толщи; 2 — докембрийские (?) образования; 3 — мантийные перидотиты; 4 — дунит-клинопироксенит-габбровый комплекс; 5 — Собский габбро-диорит-тоналитовый комплекс ( $D_{1-3}$ ). ГУР — Главный Уральский разлом. б: индексы в кружках: дуниты переходного комплекса (Д), габбро (Г) и хромиты Кэршорского проявления (К). Залитые ромбы с номерами — положение орбикулярных перидотитов.



**Рис. 2.** Микростроение орбикулярных перидотитов Войкарского массива (изображение в отраженных электронах). а — перидотит с орбикулой каплевидной формы, состоящей из хлоритового ядра с каймой вторичного диопсида и раннего клинопироксена (обр. 2214); б — перидотит с орбикулой футляровидного строения, выполненной диопсид-хлоритовой и клинопироксен-паргаситовой каймами; ядро образовано агрегатом эпидот-гроссуляр-клинохлорового состава (обр. 2009). Обозначения на рисунке: Ol — оливин, Chl — хлорит, Di — диопсид (вторичный), Cpx — клинопироксен (первичный), Hbl — амфибол (паргасит), Sp — шпинель, Ep, Gr — эпидот, гроссуляр.

В перидотитах западной (нижней) части разреза, находящихся вблизи контакта с мантийными ультрабазитами (рис. 16, обр. 2214), преобладает относительно простое строение орбикул с ядром, сложенным мелкочешуйчатым (пятнистым) агрегатом хлорита с тонкими разноориентированными пластинками диопсида (рис. 2а). На границе с оливином ядро окружено узкой (50—80 мк) каймой поперечно-шестоватого диопсида в тонком срастании с хлоритом. В составе кайм также отмечаются участки, сложенные обычным диоп-

сидом (рис. 2a), идентичным клинопироксену в матрице дунитов. Орбикулы нередко сливаются в более крупные обособления.

В перидотитах восточной (верхней) части разреза, расположенных вблизи контакта с габброидами (рис. 16, обр. 2209), картина строения усложняется появлением зональных орбикул с внешней тонкой хлорит-диопсидовой оторочкой, которая "сменяется" к центру каймой клинопироксена, а затем амфибола (паргасита); центральная часть орбикул сложена здесь агрегатом хлори-

та, эпидота, гроссуляра и серпентина (рис. 26). Амфибол не только присутствует в диопсид-хлоритовом матриксе орбикул, но также образует включения в зернах шпинели.

Минералогия перидотитов характеризуется следующими особенностями. Оливин отвечает форстериту ( $Fo_{87-90}$ ), а ранний клинопироксен диопсиду ( $X_{\rm Mg}=91-94$ ) с умеренными содержаниями глинозема (2.2-4.2%) и оксида хрома (0.4-1.3%). Вторичный диопсид орбикул более магнезиален ( $X_{Mg} = 94-97.5$ ) и обеднен элементами примесями. Амфибол отвечает паргаситу с высокими содержаниями глинозема (12.8-13.8%). Плагиоклаз представлен битовнитом ( $An_{80-84}$ ), а хлорит магнезиальным клинохлором. Шпинель перидотитов относится к обычному умеренно глиноземистому (21-23% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) и магнезиальному (XMg = 40-60) типу. В орбикулярных разновидностях она является более низкохромистой (XCr = 37-45) и малотитанистой  $(0.05-0.35\% \text{ TiO}_2)$ , в сравнении со шпинелью дунитов и плагиоперидотитов. В целом шпинель демонстрирует пологий тренд вариаций составов, в отличие от шпинели с "бонинитовым" трендом в дунитах и жильных пироксенитах мантийной части разреза (рис. 3).

В петрохимическом отношении орбикулярные перидотиты сопоставимы с диопсидсодержащими дунитами, обнаруживая невысокие содержания глинозема (1.25–2.34%), оксида кальция (0.7–1.79%) и стронция (4.6–7.0 г/т). Для них устанавливается пологий субхондритовый тип распределения РЗЭ. Плагиоперидотиты отличаются повышенным (30–60 г/т) содержанием стронция и положительной Еи-аномалией (рис. 4а).

Клинопироксен демонстрирует общее высокое содержание  $P3\mathfrak{G}$  с положительным наклоном ( $La_N/Yb_N=0.03-0.20$ ) спектров распределения элементов. При этом первичный клинопироксен орбикул обнаруживает пониженный уровень средних и тяжелых лантаноидов; паргасит обладает подобным распределением  $P3\mathfrak{G}$  (рис. 4а). В целом состав изученных клинопироксенов оказывается близок таковому в жильных дунитах, пироксенитах и породах расслоенной серии Войкарского массива [7, 9].

Геохимическое моделирование показывает, что редкоземельные составы расплавов, равновесные с клинопироксеном перидотитов, обладают сходством с составами океанических базальтоидов Войкарской офиолитовой ассоциации. При этом расплавы равновесные с клинопироксеном и амфиболом орбикул демонстрируют переходные к бонинитам характеристики (рис. 46). В сравнении с N-MORB базальтами все модельные расплавы имеют повышенный уровень Rb, Ва, Th, Pb, Sr и пониженный Zr, что согласуется с

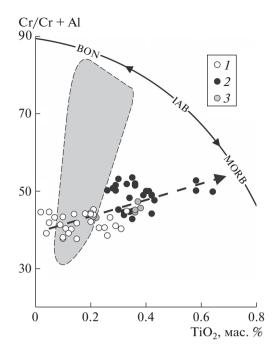
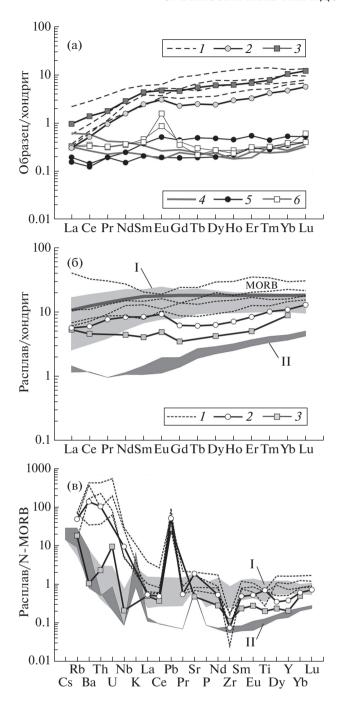


Рис. 3. Состав шпинели в перидотитах расслоенного комплекса Войкарского массива. I — орбикулярные перидотиты, 2 — дуниты, 3 — плагиоперидотиты. Залитая область — поле составов шпинели в дунитах, клинопироксенитах и вебстеритах мантийного разреза офиолитов Полярного Урала [4, 7]. ВОN, IAB, МОRВ — состав шпинели в бонинитах, базальтах островных дуг и океанических базальтах по [8] соответственно. Пунктиром показан тренд вариаций составов шпинели.

надсубдукционной природой офиолитов Войкарского массива [4, 6, 12].

Проведенное изучение перидотитов переходной зоны Войкарского массива позволяет сделать следующие выводы.

- (1) Орбикулярные перидотиты структурно конформны диопсидсодержащим дунитам и плагиоперидотитам, что свидетельствует о сопряженности их формирования. Они подобны жильным пироксенитам и габбро в подстилающих мантийных перидотитах массива, являясь, очевидно, как и последние, результатом магматической импрегнации субстрата под воздействием просачивающихся базальтоидных расплавов [7].
- (2) Орбикулярные обособления относятся к гетерогенным образованиям, состоящим из хлорит-диопсидового "мезостазиса" с включениями зерен первичного диопсида и амфибола. Мезостазис не обнаруживает признаков замещения ранних минералов (например, плагиоклаза). Овальная морфология, плавные границы орбикул и элементы ранней зональности в них (клинопироксен-паргасит) позволяют рассматривать орбикулы как сегрегации (глобулы) расплава в



оливиновой матрице, испытавшие частичную кристаллизацию *in situ*.

(3) Импрегнация перидотитов (дунитов) осуществлялась под воздействием МОRВ-подобных надсубдукционных расплавов, что подтверждается вариациями составов шпинели и результатами геохимического моделирования. Вместе с тем расплавы, равновесные с клинопироксеном и амфиболом орбикул, демонстрируют переходные к бонинитам характеристики состава (рис. 46, 4в).

В целом орбикулярные перидотиты являются полигенными породами, возникшими при импрегнации дунитов переходного комплекса офиолитов проторасплавами и продуктами их кристаллизации. Присутствие орбикулярных сегрегаций необычно для перидотитов, но согласуется с данными о существовании "замороженных" расплавов (frozen melts) базитового состава в разрезах офиолитов [14]. Появление орбикул очевидно следует связывать с нарушением режима инфильтрации вследствие изменения состава, вязкости расплавов (при смешении) и их флюидонасыщенности. Благодаря этому происходила блокировка (закупорка) межзерновых каналов миграции с образованием "тромбов" (орбикул) расплава в оливиновой матрице. Низкотемпературный метаморфизм способствовал изменению состава и структуры орбикулярных перидотитов проторасплав орбикул был преобразован в стекловатый диопсид-клинохлоровый мезостазис зонального строения, а оливин серпентинизирован. Определенное сходство с данным типом пород обнаруживают субвулканические ультрамафиты Платиноносного пояса Урала [15], однако в последних проторасплав, очевидно, имел интеркумулусную, а не импрегнационную природу.

Таким образом, в перидотитах Войкарского офиолитового массива на Полярном Урале впервые обнаружены свидетельства существования просачивающихся "замороженных" расплавов. Выделяемые орбикулярные перидотиты следует относить к особому типу импрегнированных расплавом пород в офиолитах, формирование которых было сопряжено с надсубдукционной обстановкой.

Рис. 4. Спектры распределения РЗЭ в породах, минералах (а) и модельных расплавах, равновесных с клинопироксеном и амфиболом перидотитов (б, в). Содержания нормированы к хондриту и базальту N-MORB [10]. a: 1 - клинопироксен в матрице дунитов и орбикулярных перидотитов, 2, 3 — клинопироксен и амфибол орбикул соответственно, 4 – дуниты (диопсидсодержащие), 5 — орбикулярные перидотиты, 6 плагиоперидотиты. Концентрации элементов в породах определены методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) на установке ELAN 9000. Микроэлементный состав минералов определен методом лазерной абляции в Институте геологии и геохимии УрО РАН [11]. б: 1 - pacплавы равновесные с клинопироксеном матрицы дунитов и орбикулярных перидотитов, 2, 3 — расплавы равновесные с клинопироксеном и амфиболом орбикул соответственно. I, II – области составов базальтов и бонинитов Войкарской офиолитовой ассоциации [12]. Модельные расплавы рассчитаны на основе коэффициентов разделения элементов [13]. в: мультиэлементная диаграмма с нормализацией содержаний к базальту N-MORB типа. Обозначения соответствуют рис. 4б.

# БЛАГОДАРНОСТИ

Аналитические исследования проведены в ЦКП "Геоаналитик" ИГГ УрО РАН, сотрудникам которой авторы выражают благодарность.

#### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы (№№ AAAA-A18-118052590029-6 и AAAA-A18-118053090045-8).

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Leveson D.J. //Geological Society of America Bulletin. 1966. V. 77. P. 409–426.
- 2. González-Jiménez J.M., Griffin W.L., Gervilla F., et al. // Lithos. 2014. V. 189. P. 140–158.
- Савельева Г.Н. Габбро-ультрабазитовые комплексы офиолитов Урала и их аналоги в современной океанической коре // Тр. ГИН АН СССР. М.: Наука, 1987. Вып. 404. 246 с.
- 4. *Шмелев В.Р.* // Петрология. 2011. Т. 19. № 6. С. 649—672.

- 5. *Ефимов А.А.* Габбро-гипербазитовые комплексы Урала и проблема формирования офиолитов. М.: Наука, 1984. 212 с.
- 6. *Шарков Е.В., Чистяков, А.В., Лазько Е.Е.* // Геохимия. 2001. № 9. С. 915—932.
- 7. Batanova V.G., Belousov I.A., Savelieva G.N., et al. // J. Petrol. 2011. V. 52. № 12. P. 2483–2521.
- 8. Pearce J.A., Barker P.F., Edwards S.J., et al. // Contrib. Mineral. Petrol. 2000. V. 139. P. 36–53.
- 9. *Pertsev A.N., Savelieva G.N., Simakin S.G.* // Ofioliti. 2003. № 28. P. 33–41.
- 10. Sun S.S., McDonough W.F. // Magmatism in the Ocean Basins. Geol. Soc. Sp. Publ. 1989. № 42. P. 313–345.
- Червяковская М.В., Червяковский В.С., Вотяков С.Л. // Ежегодник-2019. Тр. ИГГ УрО РАН. 2020. Вып. 167. С. 144—146.
- 12. Estrada S., Henjes-Kunst F., Burgath K-P., et al. // Z. dt. Ges. Geowiss. 2012. V. 163/1. P. 9–42.
- Bedard J.H. // Contiib. Mineral. Petrol. 2001. V. 141. P. 747–771.
- 14. *Müller T., Koepke J., Garbe-Schönberg C.-D., et al.* // Lithos. 2017. V. 272–273. P. 31–45.
- 15. *Ферштатер Г.Б., Пушкарев Е.В.* // Зап. ВМО. 1990. Вып. 1. Ч. 119. С. 51–62.

# ORBICULAR PERIDOTITES OF THE POLAR URALS: NEW EVIDENCE OF MAGMATIC IMPREGNATION IN THE OPHIOLITES

V. R. Shmelev<sup>a</sup>, V. G. Kotelnikov<sup>b</sup>, and M. V. Chervyakovskaya<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation <sup>b</sup> A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute, St. Petersburg, Russian Federation

<sup>#</sup>E-mail: shmelev@igg.uran.ru

Presented by Academician of the RAS December 28, 2020

In the ophiolites of the Voikar massif (Polar Urals), peridotites of an unusual orbicular structure were found, attributed to the impregnated type of rocks. Orbicules of these rocks are composed of a secondary clinochlore-diopside aggregate containing grains of primary clinopyroxene and pargasite. The morphology and composition of the orbicules make it possible to attribute them to segregations (globules) of the melt in the olivine matrix of peridotites, having experienced partial crystallization *in situ*. According to the results of geochemical modeling, these melts had characteristics transitional to boninites, corresponding to suprasubduction conditions. The formation of orbicular peridotites was associated with the process of blocking intergranular migration channels of the percolating basaltic melts.

Keywords: ophiolites, Voikar massif, dunites, orbicular structures, impregnation, "frozen" melts,