

УДК 550.4:551.2 (470.13)

СВИДЕТЕЛЬСТВА УЛЬТРАВЫСОКОБАРИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ ГРАНАТОВЫХ ПЕРИДОТИТОВ ПОЛЯРНОГО УРАЛА

© 2023 г. В. Р. Шмелев^{1,*}, Ф.-С. Мэн²

Представлено академиком РАН Л.Я. Арановичем 02.06.2023 г.

Поступило 02.06.2023 г.

После доработки 16.06.2023 г.

Принято к публикации 20.07.2023 г.

В гранатowych перидотитах Марункеусского эклогит-гнейсового комплекса (Полярный Урал) впервые установлены сегрегации карбонатов в ассоциации с хлорапатитом. Они содержат реликты доломита, который “замещается” кальцитом с симплектитовыми (графическими) вростками брусита и гидрокарбоната. Формирование перидотитов с необычными структурами карбонатов является результатом разноглубинной эволюции пород комплекса. В ходе глубинной субдукции и прогрессивном метаморфизме с образованием гранатowych перидотитов доломит сегрегаций испытал на пике давлений (≥ 5 ГПа) твердофазный распад на арагонит и магнезит. При эксгумации и ретроградном метаморфизме гранатowe перидотиты совместно с сегрегациями подверглись дальнейшей трансформации; арагонит был замещен кальцитом, а магнезит — бруситом и гидрокарбонатом. Присутствие карбонатов со структурами глубинного распада подтверждает принадлежность гранатowych перидотитов и эклогитов Полярного Урала к ультравысокобарическим комплексам.

Ключевые слова: Слюдяная горка, Марункеу, гранатowe перидотиты, карбонаты, симплектитовые структуры, твердофазный распад, гидратация, ретроградный метаморфизм, субдукция, эксгумация

DOI: 10.31857/S2686739723601187, EDN: LECSPI

Метаморфические комплексы зон субдукции, представленные эклогитами и гранатowymi перидотитами, проходят длительную структурно-вещественную эволюцию в широком диапазоне температур и давлений [11]. На завершающих стадиях, в ходе эксгумации и ретроградного метаморфизма происходит трансформация раннего минерального парагенезиса и его переуравновешивание при относительно низких *PT*-параметрах, с полным или частичным “стиранием” следов ранней высокобарической истории. Соответственно, при реконструкции истории комплексов крайне важным становится обнаружение минералов-индикаторов (алмаз, коэсит и др.), либо реакционных структур, маркирующих глубинные фазовые переходы. В данной работе на примере гранатowych перидотитов Слюдяной горки впервые приведены свидетельства их формирования в условиях сверхвысоких давлений, установленные по продуктам твердофазного распада карбоната.

Гранатowe перидотиты и эклогиты Полярного Урала [3] образуют серию небольших тел (район г. Слюдяная горка) в пределах докембрийского Марункеусского эклогит-гнейсового комплекса, расположенного в подошве офиолитового массива Сыум-Кеу (рис. 1). Протолитом этих пород являются габбро и перидотиты с реликтами первичных магматических структур [1, 3, 4], которые по геохимическим признакам близки рифтогенным окраинно-континентальным образованиям [13]. Данные изотопного датирования свидетельствуют о позднекембрийском (500–490 млн лет) возрасте протолита; эклогитовый метаморфизм проявился позднее в верхнем девоне (360–370 млн лет) [5, 9, 13]. Формирование гранатowych перидотитов и эклогитов Слюдяной горки было сопряжено с позднепалеозойской субдукцией континентальной [9, 13] коры, в режиме умеренных (640–800°C) температур и давлений (1.2–2.1 ГПа) [1, 5, 14]. Существуют и значительно более высокие (до 3.9 ГПа) оценки давления [2], однако убедительных доказательств этому не было представлено.

При детальном изучении гранатowych перидотитов Слюдяной горки впервые было установлено присутствие сегрегаций карбонатов с необычной симплектитовой (графической) структурой (рис. 2), которые рассматриваются нами в каче-

¹Институт геологии и геохимии Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

²Институт геологии Китайской академии геологических наук, Пекин, 100037, Китай

*E-mail: shmelev@igg.uran.ru

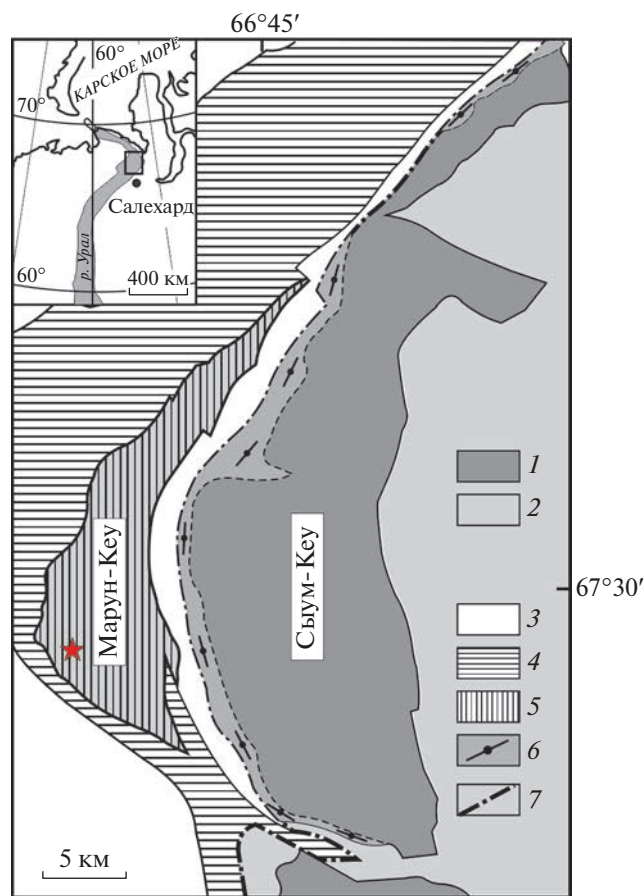


Рис. 1. Тектоническая схема области сочленения Марункеусского комплекса с офиолитами массива Сыум-Кеу по [12] с изменениями. 1–2 – офиолиты массива Сыум-Кеу; 1 – мантийные перидотиты, 2 – габбро; 3–6 – метаморфические докембрийские образования: 3 – сланцы няровейской серии, 4 – ханмейхойский гнейсо-мигматитовый комплекс, 5 – марункеусский эклогит-гнейсовый комплекс, 6 – серпентинитовый меланж. 7 – Главный Уральский разлом. Звездочкой отмечена позиция гранатовых перидотитов и эклогитов Слюдяной горки.

стве ультравысокобарических образований, модифицированных в процессе эксгумации и ретроградного метаморфизма.

Гранатовые перидотиты с сегрегациями карбонатов обнаружены в коренных выходах юго-восточного склона г. Рыжей, вблизи контакта с эклогитами ([13], рис. 2, точка 7). Породы характеризуются массивной текстурой с элементами гнейсовидного строения, в которых отмечаются согласные жило/пластообразные тела (мощностью до 1 м) ортопироксен-гранатовых пород. Они образованы агрегатом крупных ксеноморфных зерен оливины (60%), орто и клинопироксена, граната, амфибола, рудного минерала (хромита и хроммагнетита); вторичные минералы представлены клинохлором и серпентином (рис. 2 а). В пироксенах повсеместно проявлены структуры

тонко-пластинчатого распада с ильменитом и Ст-магнетитом. Гранат представлен крупными (до 1 мм) порфиробластами и мелкими рекристаллизованными необластами. Амфибол (паргасит) присутствует в виде кайм на границе с гранатом и выполняет межзерновые промежутки. Оливин и пироксены характеризуются низкой магнезиальностью в сравнении с минералами мантийных перидотитов; гранат относится к высокомагнезиальному (пироп-альмандиновому) типу (табл. 1). Ильменит (пикроильменит) обнаруживает повышенные содержания оксида магния (5.82 мас. %).

Сегрегации карбонатов присутствуют в породе в виде единичных ксеноморфных обособлений небольшого (0.2–0.5 мм) размера, которые выполняют межзерновые промежутки в оливиновой матрице, отделяясь от нее магнетитовой (магнетит-серпентиновой) или хлоритовой каймой (рис. 2 б). Они сложены преимущественно агрегатом зерен кальцита с многочисленными симплектитовыми графическими вростками (толщиной 1–5 до 10 мкм) темного оттенка; в кальците также отмечаются включения серпентинизированного оливина. Значительная часть вросток имеет форму пластинок неоднородного строения, ориентированных в основном по спайности. В отличие от кальцита они имеют существенно железомagneзиальный состав, но не относятся к магнезиту (см. ниже), как первоначально предполагалось. Однородных зерен кальцита без симплектитов не было обнаружено. В сегрегациях также отмечаются реликтовые зерна доломита, которые “замещаются” кальцитом с симплектитовыми вростками (рис. 2 б, низ рисунка). Мелкие участки доломита были встречены и внутри зерен кальцита с симплектитовым строением. Особенностью карбонатных сегрегаций является присутствие небольших (50–100 мкм) зерен апатита (рис. 2 б).

Карбонаты характеризуются обычным химическим составом (табл. 1). В кальците отмечаются небольшие примеси оксида железа (0.20–0.83%) и магния (0.2–3.4%); в доломите содержание оксида железа возрастает до 2.2–3.6%. В рамановских спектрах (рис. 3) для обоих минералов фиксируются интенсивные полосы колебаний CO_3 (1087 и 1098 см^{-1} соответственно); спектров, приписанных арагониту не было обнаружено. Апатит характеризуется повышенными содержаниями хлора (2.4–4.0%), лантана (900–1800 г/т) и стронция (4200–9700 г/т) (табл. 1). В рамановских спектрах наряду с полосой PO_4 (960 см^{-1}) отмечается небольшой пик CO_3 (1087 см^{-1}), указывающий на его принадлежность к карбонат-хлорапатиту (рис. 3).

Симплектиты, в отличие от кальцитовых матрицы, соответствуют бруситу либо гидрокарбонату. Симплектиты *бруситового* типа характеризу-

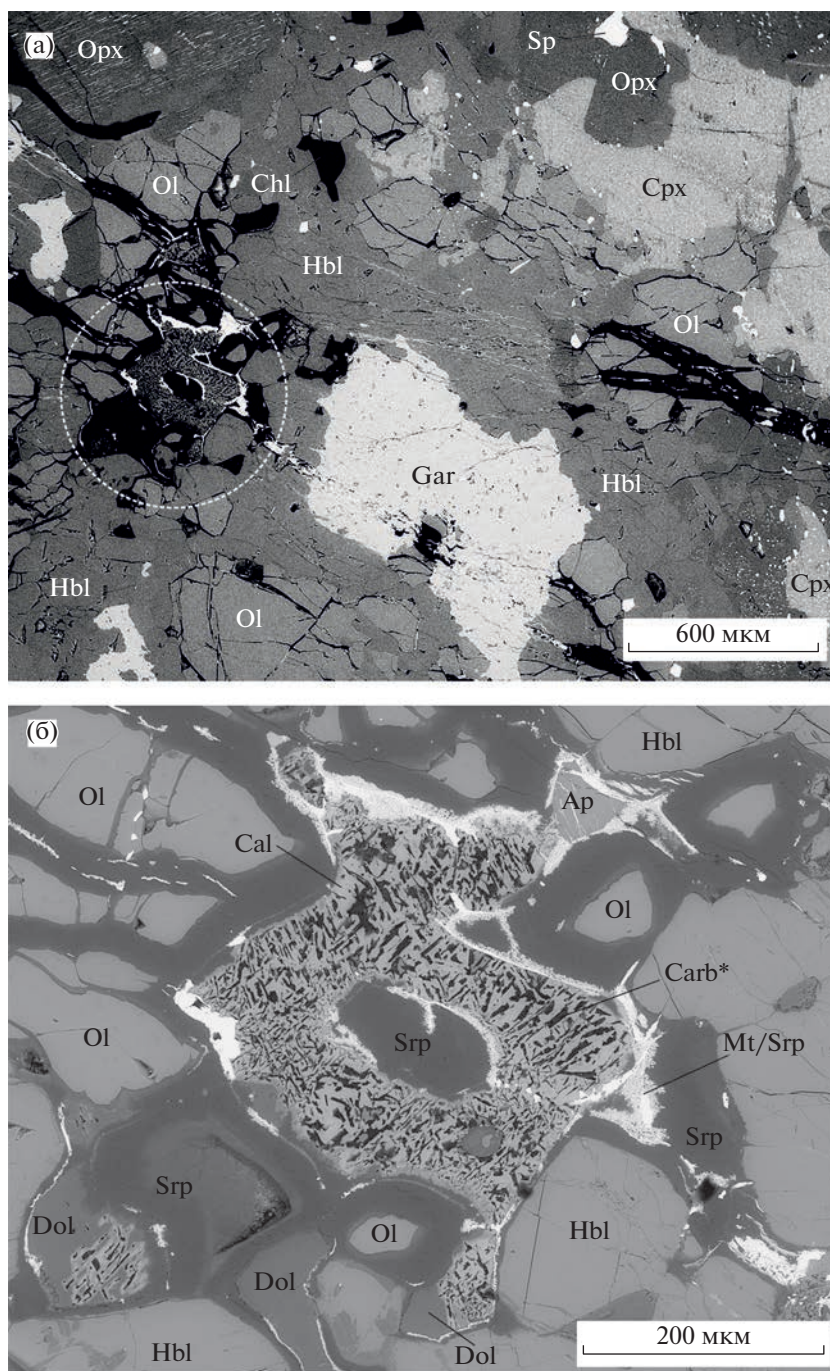


Рис. 2. Гранатовый перидотит с сегрегациями карбонатов (обр. П17- 21/1, снимки в отраженных электронах). А — обзорный вид структуры гранатового перидотита; белым кружком (слева) отмечено положение карбонатных сегрегаций. Б — детальное строение сегрегаций; в центре снимка находится крупное зерно кальцита (светлое) с включениями серпентинизированного оливина и симплектитовыми вростками (темное). Обозначения на рисунке: Ol — оливин, Срх — клинопироксен, Орх — ортопироксен, Sp — шпинель, Hbl — амфибол (паргасит), Srp — серпентин, Mt/Srp — агрегат магнетита и серпентина, Cal — кальцит, Dol — доломит, Carb* — гидрокарбонат, Ap — апатит.

ются преобладанием оксида магния (57–63%), при относительно невысоком (5–10%) содержании оксида железа (табл. 1). В рамановском спектре они обнаруживают интенсивную полосу колебаний ОН-группы (3650 см^{-1}) и мало интенсивную

“бруситовую” (443 см^{-1}) полосу. Примечательно, что в спектрах брусита постоянно отмечается “чуждая” полоса (1088 см^{-1}) переменной интенсивности, отвечающая кальциту матрицы (рис. 3). Симплектиты, отнесенные к гидратированным

Таблица 1. Представительные анализы минералов в гранатовом перидотите Слюдяной горки

Оксиды	Ap	Ol	Opх	Cpx	Gar	Hbl	Ilm	Cal	Dol	Brucite	Carb*
SiO ₂	0.00	40.00	56.15	54.40	40.63	44.55	0.16	0.03	0.13	0.01	2.06
TiO ₂		0.00	0.04	0.04	0.00	0.25	51.80				
Al ₂ O ₃	0.01	0.01	1.16	0.78	23.21	12.21	0.17				
Cr ₂ O ₃		0.01	0.07	0.12	0.03	0.65	0.27				
FeO	0.63	15.56	10.61	3.08	16.43	5.57	38.85	0.25	2.43	9.88	13.38
MnO		0.14	0.17	0.08	0.91	0.07	0.36	0.06	0.12	0.36	0.09
MgO	0.06	43.60	31.10	16.82	13.88	17.31	5.82	0.21	19.63	57.07	17.38
CaO	53.63	0.01	0.12	24.35	5.57	12.46		55.41	29.33	0.30	0.71
Na ₂ O	0.03		0.00	0.21	0.00	2.64					
NiO		0.30	0.00	0.09	0.02	0.07	0.07				
CO ₂								43.89	46.00		27.80
H ₂ O										32.39	40.50
X(mg)		0.83	0.84	0.90	0.59						

Содержания в апатите: P₂O₅ – 41.93, Cl – 3.07, F – 0.32, La – 900, Sr – 4900 г/т. X(mg) = Mg/Mg + Fe²⁺. Остальные обозначение приведены на рис. 2, 3.

карбонатам имеют железомagneзиальный состав с примесью кремнезема (1.5–2.5%) и оксида кальция (1–5%); в отличие от карбонатов и гидроксидов они характеризуются низким (29–35%) суммарным содержанием оксидов железа и магния (табл. 1). В их рамановском и ИК-спектрах присутствуют полосы H₂O (3100 и 3447 см⁻¹ соответственно), а также кальцитовая полоса (1087 см⁻¹) матрицы (рис. 3). По расчетным содержаниям CO₂ и H₂O (табл. 1) гидрокарбонаты близки несквегониту, обогащенному железистым компонентом – (Mg, Fe) CO₃*3H₂O. Состав и локализация симплектитов позволяют рассматривать их в каче-

стве продуктов низкотемпературной гидратации и замещения ранее существовавшего магнезита (ферромагнезита). Обогащенность гидрокарбонатов железом, возможно, была обусловлена его привнесом из вмещающей матрицы.

Природа обнаруженных сегрегаций карбонатов в гранатовых перидотитах Слюдяной горки недостаточно ясна, однако очевидно, что по отношению к вмещающей матрице они являются структурно и минералогически чуждыми образованиями. Сегрегации могут представлять собой ксеногенный материал (ксенокристы), захваченный магматическим расплавом, либо являться продуктами кристаллизации просачивающихся углекислых флюидов (расплавов). Присутствие хлорапатита (обогащенного лантаном и стронцием), в большей степени отражает флюидно-мантийную [16] природу этих образований.

Вне зависимости от природы сегрегаций установленная структурная картина (рис. 2 б) ясно свидетельствует о том, что в перидотитах реализовался процесс трансформации исходного карбоната (доломита) с образованием кальцита и агрегата симплектитов. Формально подобная картина может являться результатом низкотемпературной гидратации доломита с образованием псевдоморфоз кальцита и брусита (гидрокарбоната); примером таких преобразований считаются, например карбонат-содержащие гранатовые перидотиты Восточных Альп [8]. Вместе с тем развитие симплектитовых структур в карбонатах в отсутствие других морфологических проявлений (например кайм, прожилков), а также их связь исключительно с комплексами высоких давлений, дают основания полагать, что гидратация доломита не является пер-

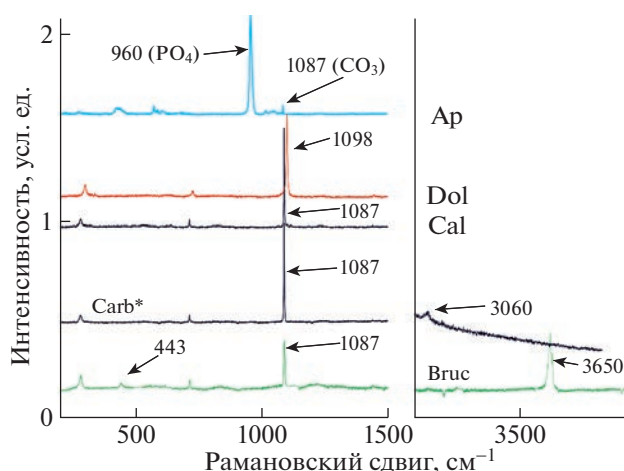


Рис. 3. Рамановские спектры минералов из карбонатных сегрегаций в гранатовом перидотите: Ap – апатит, Dol – доломит, Cal – кальцит, Bruc – брусита Carb* – гидрокарбонат.

вопричиной их возникновения. Формирование симплектитов, вероятно, было полистадийным и первоначально было связано с процессом твердофазного распада доломита, а не с его гидратацией. Такой распад согласно экспериментальным данным [6, 12, 17] реализуется при ультравысоких (≥ 5 ГПа) давлениях с образованием арагонита и магнезита, которые впоследствии модифицируются. Реальным геологическим подтверждением подобного процесса пока являются только мантийные перидотиты (с симплектитами магнезита в кальците) ультравысокобарического террейна Сулу (Китай), испытавшие глубокое (свыше 150 км) погружение в зоне субдукции [15]. В сравнении с ними гранатовые перидотиты Слюдяной горки являются примером протораспада доломита, поскольку его продукты в результате ретроградного метаморфизма испытали значительные преобразования: первичный арагонит трансформировался в кальцит, а магнезит (ферромагнезит) симплектитов испытал гидратацию с замещением бруситом и гидрокарбонатом.

Следует отметить, что наблюдаемый в орто- и клинопироксенах, а также хромшпинелиде перидотитов распад с выделением пикроильменита, возможно, был комплементарен протораспаду доломита.

Вышеизложенное дает основание предложить следующую последовательность эволюции гранатовых перидотитов и эклогитов Слюдяной горки в ходе субдукции – эксгумации Марункеусского комплекса (рис. 4). В магматическую стадию происходит формирование позднекембрийского рифтогенного перидотит-габбрового комплекса Слюдяной горки, который испытал инфильтрацию мантийными (?) углекислыми флюидами и импрегнацию карбонатным веществом. В субдукционную стадию (I) в ходе прогрессивного метаморфизма протолит был преобразован в эклогиты и гранатовые перидотиты, а доломит сегрегаций при достижении пика давлений ($P \geq 5$ ГПа, глубина ≥ 150 км) трансформировался в арагонит и магнезит. В стадию эксгумации и высокобарического (до 2 ГПа) ретроградного метаморфизма (II) произошло окончательное становление гранатовых перидотитов и эклогитов; арагонит сегрегаций испытал фазовую трансформацию и был замещен кальцитом. На завершающих стадиях (III) при выведении на малоглубинный коровый уровень гранатовые перидотиты испытали низкотемпературный водный метаморфизм (серпентинизацию); при гидратации первичный магнезит симплектитов был замещен бруситом и гидрокарбонатом (рис. 4).

Таким образом, обнаружение в эклогит-перидотитовой ассоциации Полярного Урала сегрегаций карбонатов с симплектитовым строением, вероятно, являющихся результатом глубинного

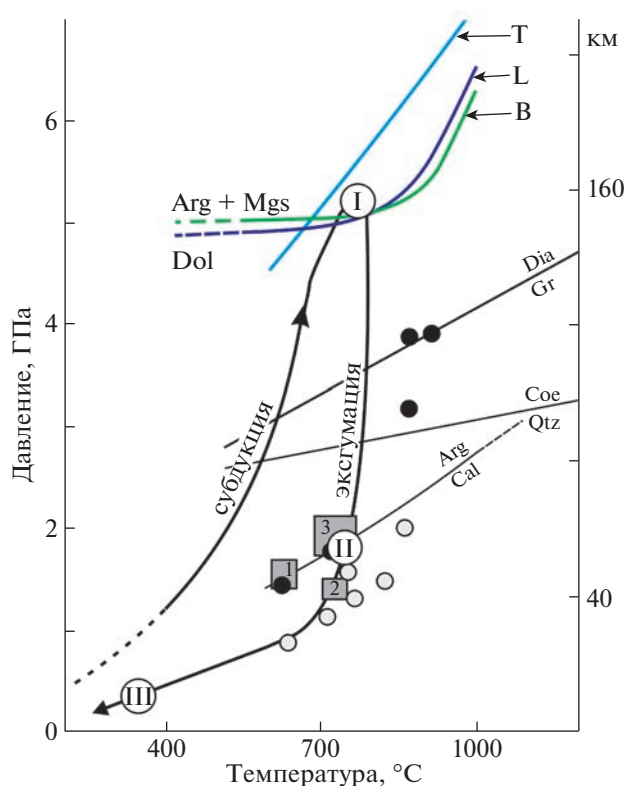


Рис. 4. *P-T*-тренд эволюции гранатовых перидотитов с сегрегациями карбонатов в ходе субдукции и эксгумации Марункеусского блока. Стадии эволюции (цифры в кружках): I – субдукционная стадия, завершившаяся распадом доломита с образованием симплектитов; II – стадия эксгумации и ретроградного метаморфизма, завершившаяся формированием гранатовых перидотитов и эклогитов; III – стадия низкотемпературного метаморфизма перидотитов с замещением магнезита бруситом и гидрокарбонатом. Залитые кружки – параметры метаморфизма гранатовых перидотитов (черное) и эклогитов (белое) по [2]. Квадраты с номерами (1, 2, 3) – параметры метаморфизма по [13], [5], [1]. Границы фазовых переходов (линии): доломит = арагонит + магнезит ($Dol = Arg + Mgs$) – T, L, B по [6, 11, 16]; алмаз–графит ($Dia = Gr$) и коэсит – кварц ($Coe = Qtz$) по [7]; арагонит – кальцит ($Arg = Cal$) по [9].

твердофазного распада доломита, подтверждает их исходную принадлежность к ультравысокобарическим (потенциально алмазоносным) образованиям.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены при поддержке Российского научного фонда (проект 22-17-00177) и Национального фонда естественных наук Китая (41672031). Исследования проведены в рамках государственного задания ИГГ УрО РАН (№ 123011800009-9), с использованием оборудования ЦКП “Геоаналитик” ИГГ УрО РАН, дооснащение и комплексное развитие которого осуществляются при финансовой поддержке Мини-

стерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2021-680).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лю И., Перчук А.Л., Арискин А.А. Высокобарный метаморфизм в перидотитовом кумулате комплекса Марун-Кей, Полярный Урал // Петрология. 2019. Т. 27. № 2. С. 138–160.
2. Селятицкий А. Ю., Куликова К. В. Первые данные о проявлении УНР-метаморфизма на Полярном Урале // ДАН. 2017. Т. 476. № 6. С. 681–684.
3. Удовкина Н.Г. Эклогиты Полярного Урала. М.: Наука, 1971. 192 с.
4. Уляшева Н.С., Пыстин А.М., Панфилов А.В., Потанов И.Т. Две серии первично-магматических пород в Марункеусском эклогит-гнейсовом комплексе (Полярный Урал) // Вестник Института геологии Коми научного центра УрО РАН. 2015. № 11 (251). С. 3–12.
5. Шацкий В.С., Симонов В.А., Ягоуц Э. и др. Новые данные о возрасте эклогитов Полярного Урала // ДАН. 2000. Т. 371. № 4. С. 519–523.
6. Buob A., Luth R.W., Schmidt M.W., Ulmer P. Experiments on CaCO_3 – MgCO_3 solid solutions at high pressure and temperature // American Mineralogist. 2006. V. 91. P. 435–440.
7. Day H.W. A revised diamond-graphite transition curve // American Mineralogist. 2012. V. 97. P. 52–62.
8. Forster B., Braga R., Aulbach S., Lo Pò D., Bargossi G.M., Mair V. A petrographic study of carbonate phases in the Ulten Zone ultramafic rocks: insights into carbonation in the mantle wedge and exhumation-related decarbonation // Ofioliti. 2017. V. 42 (2). P. 105–127.
9. Glodny J., Pease V.L., Montero P., Austrheim H., Rusin A.I. Protolith ages of eclogites, Marun-Keu complex, Polar Urals, Russia: implications for the pre- and early Uralian evolution of the northeastern European continental margin // Geological Society of London. Memoirs. 2004. V. 30. P. 87–105.
10. Johannes W., Puhon D. The calcite–aragonite transition, reinvestigated // Contributions to Mineralogy and Petrology. 1971. V. 31. P. 28–38.
11. Liou J.G., Zhang R.Y., Ernst W.G. Very high-pressure orogenic garnet peridotites // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2007. V. 104 (22). P. 9116–9121.
12. Luth R.W. Experimental determination of the reaction aragonite + magnesite = dolomite at 5 to 9 GPa // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2001. V. 141. P. 222–232.
13. Meng F., Yazhou F., Shmelev V.R., Kulikova K.V. Constraints of eclogites from the Marun-Keu metamorphic complex on the tectonic history of the Polar Urals (Russia) // Journal of Asian Earth Sciences. 2020. V. 187. 104087. P. 1–12.
14. Molina J.F., Austrheim H., Glodny J., Rusin A. The eclogite of the Marun-Keu complex, Polar Urals (Russia): fluid control on reaction kinetics and metasomatism during high P metamorphism // Lithos. 2002. V. 61. P. 55–78.
15. Su B., Chen Y., Guo S., Liu J.B. Dolomite dissociation indicates ultra-deep (>150 km) subduction of a garnet-bearing dunite block (the Sulu UHP terrane) // American Mineralogist. 2017. V. 102 (11). P. 2295–2306.
16. O'Reilly S.Y., Griffin W.L. Apatite in the mantle: implications for metasomatic processes and high heat production in Phanerozoic mantle // Lithos. 2000. V. 53. P. 217–232.
17. Tao R., Zhang L., Zhang L. Redox evolution of western Tianshan subduction zone and its effect on deep carbon cycle // Geoscience Frontiers. 2020. V. 11. P. 915–924.

EVIDENCE OF ULTRAHIGH-PRESSURE EVOLUTION OF GARNET PERIDOTITES IN THE POLAR URALS

V. R. Shmelev^{a, #} and F.-C. Meng^b

^aInstitute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation

^bInstitute of Geology Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037 China

[#]E-mail: shmelev@igg.uran.ru

Presented by Academician of the RAS L.Y. Aranovich June 2, 2023

In garnet peridotites of the Marunkeu eclogite-gneiss complex (Polar Urals), segregations of carbonates in association with chlorapatite were first established. They contain relics of dolomite, which is “replaced” by calcite with symplectite (graphic) intergrowths of brucite and hydrocarbonate. The formation of peridotites with unusual carbonate structures is the result of the evolution of this complex at different depths. During deep subduction and progressive with the formation of garnet peridotites, segregated dolomite experienced a solid-phase breakdown into aragonite and magnesite at the pressure peak (≥ 5 GPa). During exhumation and retrograde metamorphism, garnet peridotites, together with segregations, underwent low-temperature transformations; aragonite was replaced by calcite, and magnesite by brucite and hydrocarbonate. The presence of carbonates with deep-seated structures confirms that the garnet peridotites and eclogites of the Polar Urals belong to ultrahigh-pressure complexes.

Keywords: Mica hill, Marunkeu, garnet peridotites, carbonates, symplectite structures, solid-phase breakdown, hydration, retrograde metamorphism, subduction, exhumation