



Арктический вектор геологических исследований Arctic vector of geological research

УДК 549.6:552.16:552.4 + 552.321.6

DOI: 10.19110/2221-1381-2018-2-38-47

СОСТАВ ГРАНАТА КАК ОТРАЖЕНИЕ КОРОВОГО ГЕНЕЗИСА ПРОТОЛИТОВ УНР-ПЕРИДОТИТОВ КОМПЛЕКСА МАРУН-КЕУ (ПОЛЯРНЫЙ УРАЛ)

А. Ю. Селятицкий¹, К. В. Куликова²

¹Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН, Новосибирск, *selya@igm.nsc.ru*

²Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, *fopolina1@yandex.ru*

Мантийные и коровые УНР-перидотиты в коллизионных зонах несут принципиально разную петрогенетическую информацию: первые характеризуют состав и сложную РТ-эволюцию реститового мантийного вещества (альпинотипные перидотиты), вторые отражают многостадийные изменения при метаморфизме корового магматического протолита. Нами исследована специфика химизма гранатов из УНР-перидотитов комплекса Марун-Кеу на Полярном Урале в сравнении с гранатами из коровых и мантийных перидотитов УНР-коллизионных зон мира. Гранат в силу сложного химического состава является одним из основных минералов, отражающих особенности как валового состава, так и РТ-эволюции пород при метаморфизме. Наличие реликтовых участков плагиоклазсодержащих протолитов в телах гранатовых перидотитов комплекса Марун-Кеу прямо указывает на их коровое низкobarическое происхождение, а гранат из перидотитов Марун-Кеу по составу соотносится с гранатами коровых УНР-ультрамафитов коллизионных зон Казахстана, Норвегии и Китая. Термобарометрические сопоставления показали, что разница в составе пиковых гранатов из перидотитов двух генетических типов определяется не РТ-условиями их образования. Гранат коровых перидотитов, являясь метаморфическим минералом, отражает валовый состав магматических протолитов и может служить индикатором корового генезиса ультрамафитов в УНР-коллизионных зонах.

Ключевые слова: комплекс Марун-Кеу, Полярный Урал, гранат, коровые и мантийные перидотиты, УНР-метаморфизм.

GARNET AS INDICATOR OF THE PROTOLITH TYPE OF UHP-PERIDOTITES FROM MARUN-KEU COMPLEX (POLAR URALS, N. RUSSIA)

A. Yu. Selyatitskii¹, K. V. Kulikova²

¹VS Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk,

² Institute of Geology Komi SC UB RAS, Syktyvkar

Mantle and crustal peridotites contain principally different petrogenetic information. The former characterize composition and thermodynamic conditions of mantle restitic material emplaced into the crust, the latter reflect multistage metamorphic evolution of crustal magmatic protoliths. Chemical peculiarities of garnet from garnet peridotites of Marun-Keu UHP-complex from Polar Urals (N. Russia) in comparison with garnet from crustal and mantle peridotites of different collision zones were studied. The relic areas of plagioclase-bearing protoliths in garnet peridotite bodies of Marun-Keu Complex are obvious evidence of their crustal low pressure origin. The composition of garnet from Marun-Keu UHP-ultramafics is similar to crustal UHP-peridotites of collision zones of N. Kazakhstan, W. Norway, N.-W. China and E. China. Thermobarometric comparison showed that PT-conditions are not the reason of chemical differences of peak garnets from two genetic types of peridotites. Multiple chemical composition of peak metamorphic garnets as a function of petrochemical composition of peridotites can be used as indicator of crustal/mantle genesis of ultramafics in UHP-collision zones.

Keywords: Marun-Keu Complex, Polar Urals, garnet, crustal and mantle peridotites, UHP-metamorphism.

Введение

Многие гранатовые перидотиты, проявленные на современном эрозивном срезе коллизионных зон сверхвысоких давлений (УНР), возникли путем внедрения в глубоко субдуцированную литосферную плиту тектонических фрагментов пластичных масс горных пород, представлявших собой в разной степени истощенный реститовый мантийный материал, сформировавшийся при образова-

нии и экстракции базальтовых выплавов, — мантийные (альпинотипные) перидотиты. Они имеют все геохимические признаки мантийных ультраосновных пород [5].

Некоторые коллизионные гранатовые УНР-перидотиты по геохимическим признакам кардинально отличаются от типичных мантийных пород пониженными содержаниями MgO, Cr, Ni и повышенными содержаниями



FeO, MnO, CaO, TiO₂, Al₂O₃, обогащены Zr, Y, Nb, PЗЭ [5]. Для них был предложен термин «коровые перидотиты» [10], поскольку их магматические протолиты были сформированы в земной коре еще до субдукции; затем, при субдукции в составе земной коры, они погрузились в мантию и испытали УНР-метаморфизм [11, 12, 29].

Очевидно, что мантийные и коровые перидотиты несут принципиально разную петрогенетическую информацию. Первые характеризуют состав и сложную РТ-эволюцию мантийного вещества, вторые отражают многостадийные изменения при метаморфизме корового ультрамафитового протолита. Распознавание этих пород дает ценные сведения о процессах НР-УНР-метаморфизма и природе их протолитов.

Поскольку минералы мантийных и «коровых» перидотитов одни и те же (оливин, пироксены, гранат, шпинель), а валовый состав двух типов пород существенно различается [5], для диагностики генетического типа коровых УНР-гранатовых перидотитов необходимо знать особенности состава слагающих их минералов. Микронзондовый анализ минералов на главные и некоторые редкие (напр., Cr и Ni) элементы является наиболее быстрым и

эффективным методом получения первичной геохимической информации. При изучении УНР-гранатовых перидотитов в коллизионных зонах аналитические данные по составам минералов могут помочь решить задачу о генезисе этих пород.

Данное исследование является логическим продолжением работы [7]. Гранат в силу сложного химического состава является одним из основных минералов, отражающих особенности как валового состава, так и РТ-эволюции пород при метаморфизме. Поэтому в настоящей статье исследуются химические особенности гранатов из УНР-перидотитов комплекса Марун-Кей на Полярном Урале в сравнении с гранатами из мантийных и коровых перидотитов УНР-коллизионных зон мира.

Геологическое строение комплекса

Эклогит-гнейсовый комплекс Марун-Кей (рис. 1) представляет собой тектонический блок ~14×70 км, вытянутый в субмеридиональном направлении и ограниченный тектоническими контактами от вулканогенно-осадочных образований [9]. В южной части комплекса в его состав входят пироповые и алмандиновые эклогиты [1, 9, 10], грана-

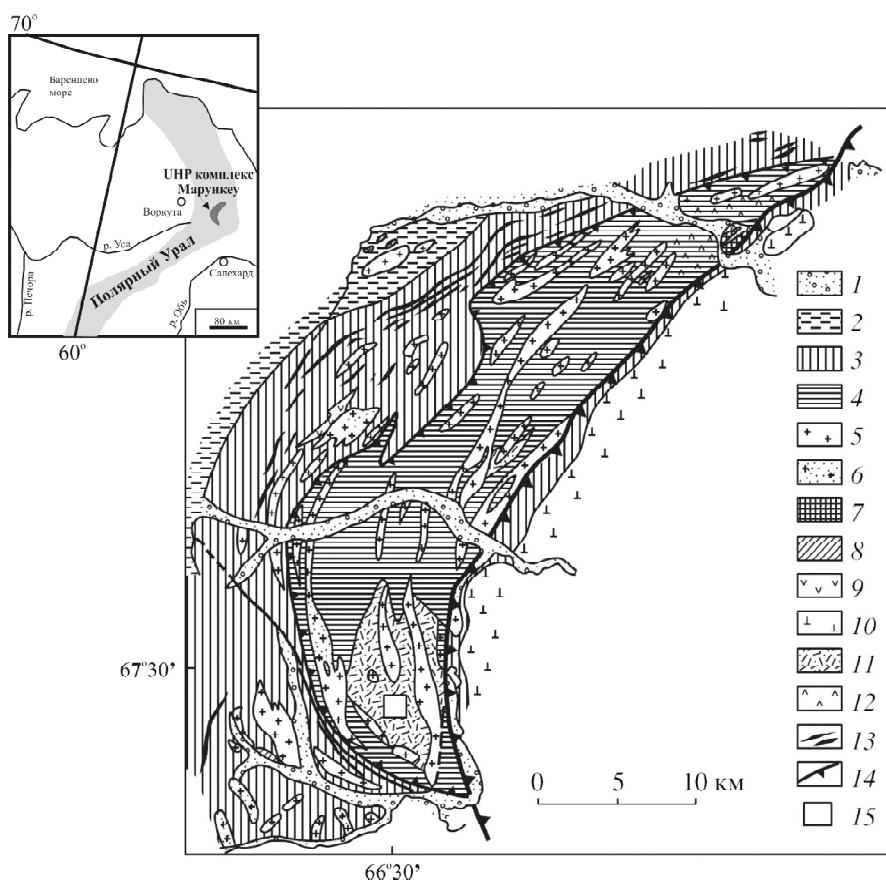


Рис. 1. Схема геологического строения комплекса Марун-Кей, по [9]:

1 — четвертичные отложения, 2 — палеозойские отложения, 3 — няровейская серия: конгломераты, сланцы с прослоями кварцитов, песчаников, мраморов и эффузивов, 4 — УНР-комплекс Марун-Кей: амфиболиты, гнейсы, гнейсограниты, эклогиты, гранатовые перидотиты, 5 — граниты, плагиограниты, гнейсограниты, 6 — гранитоиды с флюоритом, 7 — фельзит-порфиры, 8 — диориты, 9 — габбро, габбро-диабазы, диабазы, 10 — гипербазиты Сyum-Кей, 11 — районы распространения эклогитов, 12 — породы с глаукофаном, 13 — кварц-графитовые сланцы, 14 — зоны нарушений, 15 — район Слюдяной Горки

Fig. 1. Geologic scheme of Marun-Keu Complex after [9]:

1 — Quaternary sediments, 2 — Paleozoic sediments, 3 — Niaroveiskaya Suit: conglomerates, shists with interlayers of quartzite, sandstones, marbles and effusive rocks, 4 — Marun-Keu UHP-complex: amphibolites, gneiss, granite-gneiss, eclogites, garnet peridotites, 5 — granites, plagiogranite, granite-gneiss, 6 — fluorite-bearing granitoides, 7 — felsic porphyry, 8 — diorites, 9 — gabbro, microgabbro, dolerites, 10 — ultramafic rocks of the Syum-Keu Complex, 11 — eclogite predominating area, 12 — occurrence of glaucophane rocks, 13 — quartz-graphite schist, 14 — tectonic contact, 15 — Slyudyanaya Gorka locality

товые перидотиты, гранатовые амфиболиты, плагиогнейсы и слюдяные сланцы, граниты, разнообразие по составу blastsmilonites и мигматиты. Пироповые эклогиты и гранатовые перидотиты находятся в ю.-в. части хребта Марун-Кей. Они образуют массивные блоки, окруженные зонами blastsmilonites и находящиеся во вмещающей вулканогенно-осадочной толще, сложенной полосчатым чередованием кварц-полевошпатовых гнейсов, алмандиновых эклогитов и гранатовых амфиболитов. В телах гранатовых ультрамафитов сохранились реликтовые участки неметаморфизованных исходных магматических пород (плагиоперидотитов и меланотроктолитов).

Образцы гранатовых ультрамафитов отобраны с южного склона и юго-восточного подножия г. Рыжей и с южного склона г. Перидотитовой. Краткое петрографическое описание пород приведено в [6, 7].

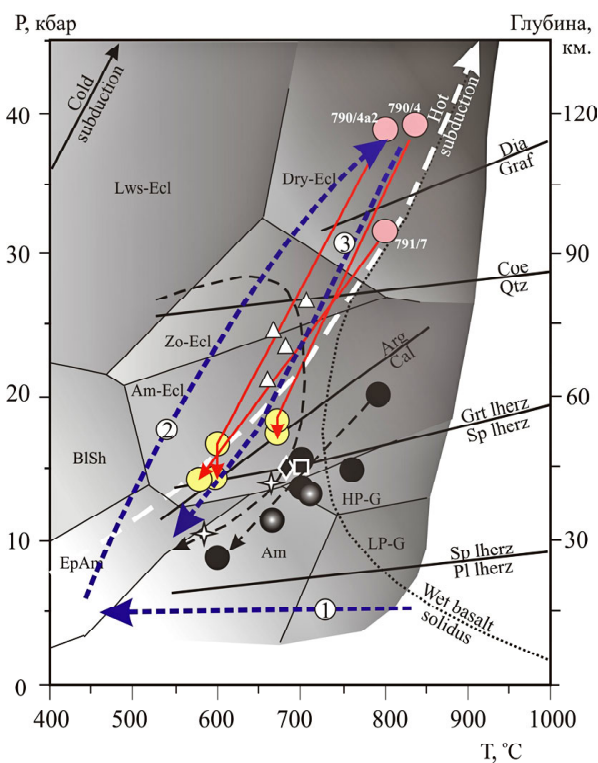


Рис. 2. Метаморфическая РТ-эволюция гранатовых ультрамафитов комплекса Марун-Кей, Полярный Урал, по данным [6]: Розовые и желтые кружки — гранатовые перидотиты [6]; чёрные кружки — эклогиты и blastsmilonites по ним, черные кружки с белым центром — клинопироксен-гранат-кварц-плагиоклазовые кристаллосланцы [2]; квадрат — эклогиты [22]; ромб — эклогитизированное габбро [19]; звездочки — эклогиты [20], треугольник — кианитовые эклогиты [3]. Ссылки на экспериментальные равновесия см. в работе [7]. Тонкие стрелки — РТ-тенды регрессивной эволюции: красные сплошные — гранатовых ультрамафитов (перидотитов и оливиновых вебстеритов) [6]; кривая черная пунктирная — эклогитов из РТ-области устойчивости коэсита [20]; прямая черная пунктирная — эклогитов [2]. Фигурные зеленые стрелки с цифрами в кружках показывают РТ-путь метаморфической эволюции гранатовых ультрамафитов Марун-Кей и их протолитов: 1 — остывание интрузива в земной коре после внедрения (магматические плагиоклазодержащие протолиты гранатовых ультрамафитов), 2 — предположительный РТ-путь прогрессивного метаморфизма протолитов, 3 — регрессивный РТ-путь метаморфизованных магматических протолитов (гранатовых ультрамафитов)

Fig. 2. P-T estimates of metamorphism of garnet peridotites of Marun-Keu Complex, Polar Urals, after [6]: Pink and yellow rings — garnet peridotites [Селятицкий, Куликова-дан]; black rings — eclogites and eclogitic blastsmilonites, black rings with white center — Cpx-Grt-Qtz-Pl shales [2]; square — eclogites [22]; alabato — eclogitised gabbro [19]; stars — eclogites [20]; triangles — Ky eclogites [3]. References to experimental curves and metamorphic facies see in [7]. Red arrows — regressive P-T-trends for three samples of Marun-Keu ultramafics; black dotted curved arrow — regressive trend of eclogites from P-T-stability field of coesite [20]; black dotted straight arrow — regressive P-T trend of eclogites, eclogitic blastsmilonites and Cpx-Grt-Qtz-Pl shales [2]. Bold dark blue dotted arrows with numbers in rings P-T-trend of metamorphic evolution of Marun-Keu garnet ultramafics and their protoliths: 1 — cooling of Marun-Keu ultramafic intrusive protoliths after intrusion into Earth's crust; 2 — conjectural P-T-trend of progressive metamorphism of Marun-Keu protoliths into garnet peridotites during subduction; 3 — combined regressive P-T-trend for Marun-Keu garnet peridotites

УНР-метаморфизм

Метаморфизмом сверхвысоких давлений (Ultrahigh pressure metamorphism) называют метаморфические процессы в мантии, протекающие в поле стабильности коэсита и/или алмаза при давлении ≥ 27 –28 кбар [13]. Гранатовые перидотиты являются широко распространенным компонентом многих коллизионных зон, где проявлен УНР-метаморфизм. Образование граната в перидотитах указывает на минимальное давление 14–18 кбар.

По последним данным, марункеуская структура представляет собой УНР-террейн — данные минеральной геотермобарометрии гранатовых ультрамафитов (гранатовых перидотитов и гранат-оливиновых вебстеритов) блока Марун-Кей свидетельствуют о том, что эти породы испытали метаморфизм при сверхвысоких давлениях [6]: РТ-параметры пика метаморфизма достигали 39 кбар, 830 °С (область устойчивости алмаза). РТ-параметры регрессивного этапа варьируют от 18.5 кбар 670 °С до 14 кбар 575 °С (рис. 2). На этом же рисунке отражены РТ-оценки пика метаморфизма эклогитов по данным разных авторов; они сопоставляются с регрессивным этапом гранатовых перидотитов. Количественные РТ-оценки УНР-метаморфизма эклогитов пока отсутствуют, что, на наш взгляд, объясняется сильными регрессивными преобразованиями эклогитов и плохой сохранностью минеральных реликтов УНР-этапа. Подробнее этот вопрос рассмотрен нами ранее [7]. Отметим, что в эклогитах комплекса обнаружены косвенные признаки УНР-метаморфизма в поле коэситовой субфации — включения поликристаллического кварца в гранате, окруженные радиальными трещинами и интерпретируемые как псевдоморфозы кварца по коэситу [20].

Химическая зональность граната

В ультрамафитах комплекса Марун-Кей установлено четыре генерации граната, что позволило выделить в их метаморфической эволюции прогрессивный этап (Grt-1), пик метаморфизма (Grt-2) и две стадии регрессивного этапа (Grt-3 и Grt-4) [7]. Химическая неоднородность порфиробластов граната (рис. 3, 4) обусловлена несколькими причинами: 1) зональностью кристаллов по направлению «центр — край» (Grt-1 → Grt-2, либо Grt-2 → Grt-3);

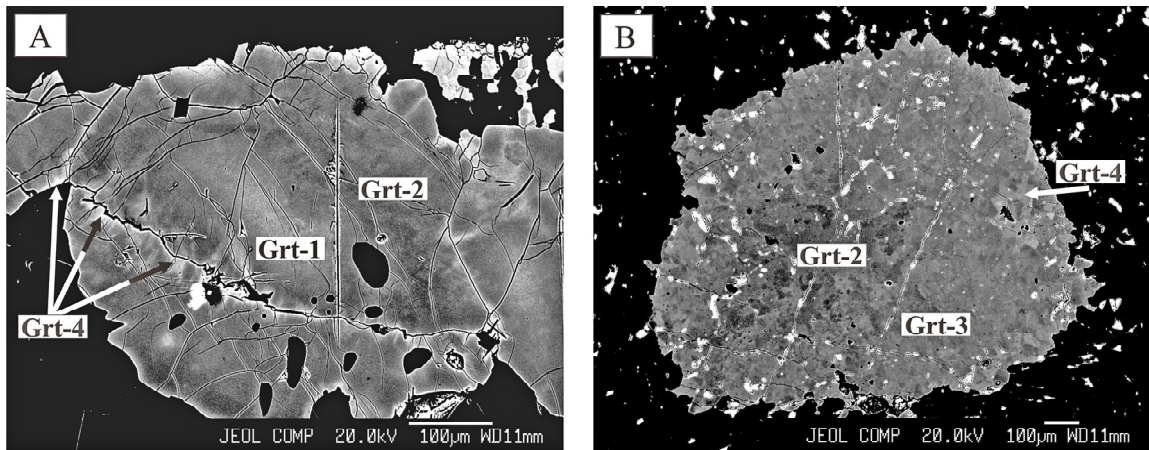


Рис. 3. BSE-изображения кристаллов граната из перидотитов Марун-Кей: А — гранат с прогрессивной зональностью Grt-1 → Grt-2 и развитием Grt-4 по трещинам; В — гранат с регрессивной зональностью Grt-2 → Grt-3 и образованием самого позднего, блочного, Grt-4 по Grt-3 [6, 7]

Fig. 3. BSE-images of garnet crystals from Marun-Keu peridotites:

A — garnet crystal with progressive zonation Grt-1 → Grt-2 and development Grt-4 along cracks; B — garnet crystal with regressive zonation Grt-2 → Grt-3 and development domains of Grt-4 after Grt-3 [6, 7]

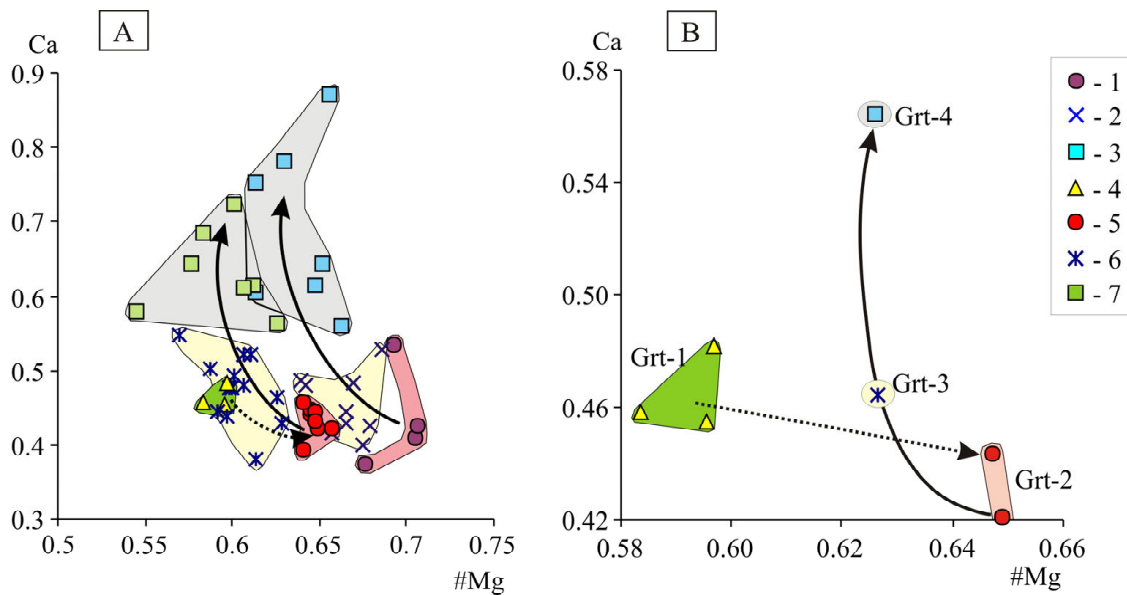


Рис. 4. Эволюция химического состава граната при метаморфизме ультрамафитов террейна Марун-Кей:

А — две группы образцов, выделенные по соотношению Fe и Mg (пояснения в тексте, подробнее в [7]); В — химическая эволюция граната из обр. 790/4. Точечной стрелкой показана прогрессивная эволюция состава граната, сплошными стрелками — регрессивная. Зелёное поле — ядра кристаллов с прогрессивной зональностью (прогрессивный Grt-1); розовое поле — внешние и краевые части порфиробластов с прогрессивной зональностью и ядра порфиробластов с регрессивной зональностью (пиковый Grt-2); жёлтое поле — край порфиробластов с регрессивной зональностью и матрикс (регрессивный Grt-3); серое поле — отдельные домены и облаковидные пятна, ореолы вокруг трещин и тонкие каймы по краю порфиробластов с регрессивной зональностью (регрессивный Grt-4). 1—3 — гранат из образцов группы I: 1 — Grt-2, 2 — Grt-3, 3 — Grt-4; 4—7 — гранат из образцов группы II: 4 — Grt-2, 5 — Grt-2, 6 — Grt-3, 7 — Grt-4

Fig. 4. Chemical evolution of garnet during metamorphism of Marun-Keu ultramafics:

A — two groups of specimens, depending from Fe and Mg proportion in garnet (explanation is in text, more details in [7]), B — garnet from specimen 790/4. Dotted and solid arrows — progressive and regressive evolution of garnet, respectively. Green field — cores of garnet porphyroblasts with progressive zonation (progressive Grt-1); pink field — outer parts and rims of garnet porphyroblasts with progressive zonation (peak Grt-2); yellow field — rims of garnet porphyroblasts with regressive zonation (regressive Grt-3); gray field — aureoles along cracks, thin unclosed rims, domains and cloudy maculas in garnet porphyroblasts with regressive zonation (regressive Grt-4). 1—3 grope I specimens: 1 — Grt-2, 2 — Grt-3, 3 — Grt-4; 4—7 — grope II specimens: 4 — Grt-2, 5 — Grt-2, 6 — Grt-3, 7 — Grt-4



Таблица 1. Используемая база данных по составам гранатов из коровых и мантийных перидотитов УНР-коллизонных зон

Table 1. Database with garnet composition from crustal and mantle peridotites of UHP-collision zones

Коровые перидотиты / Crustal peridotites (46)	Мантийные перидотиты / Mantle peridotites (70)
<i>Россия, Полярный Урал: террейн Марун-Кей</i> [наши данные] / <i>Marun-Keu terrain, Polar Urals</i> (our data) (12)	<i>Норвегия: Западный гнейсовый регион</i> / <i>Western gneiss region, Norway</i> [12, 25] (10)
<i>Казахстан: Кокчетавский массив</i> / <i>Kokchetav massif, Kazakhstan</i> [8] (10)	<i>Китай: террейн Сулу</i> / <i>Sulu terrain, China</i> [21, 27–30] (38)
<i>Норвегия: Западный гнейсовый регион</i> / <i>Western gneiss region, Norway</i> [12] (11)	<i>Индонезия: о-в Сулавеси</i> / <i>Sulawesi island, Indonesia</i> [17, 18] (13)
<i>В. Китай: террейн Даби</i> / <i>Dabi terrain, E China</i> [29] (5)	<i>Европа / Europe:</i> – Бланский массив, Чехия / <i>Blansko massif, Czech</i> [23] – Западные Альпы / <i>Western Alps</i> [14, 15] – Центральные Альпы / <i>Central Alps</i> [24] (9)
<i>С.-З. Китай: террейн Алтын-Таг</i> [26] / <i>Altyn-Tag terrain, NW China</i> (8)	

Примечание. В скобках — количество анализов граната; для марункеуских ультрамафитов указано количество анализов пикового граната.

Note. Data in brackets — number of analysis of garnet.

Таблица 2. Состав пикового граната (Grt-2) из ультрамафитов Марун-Кей в сравнении с составом гранатов из коровых и мантийных перидотитов УНР-коллизонных зон мира

Table 2. Chemical composition of peak garnet from Marun-Keu ultramafics compared with garnet composition from crustal and mantle peridotites of UHP-collisional belts

FeO	MnO	MgO	CaO	Cr ₂ O ₃	#Mg
Коровые гранатовые УНР-перидотиты / Crustal garnet UHP-peridotites					
<i>Террейн Марун-Кей, Полярный Урал / Marun-Keu terrain, Polar Urals</i>					
14.35 (12.6–15.6)	0.53 (0.33–0.96)	15.85 (14.8–17.6)	5.52 (4.75–6.84)	0.11 (0.00–0.43)	0.66 (0.64–0.71)
<i>Кокчетавский массив. С. Казахстан / Kokchetav massif. N Kazakhstan</i>					
14.28 (13.2–15.3)	0.24 (0.15–0.30)	16.20 (14.5–18.2)	4.99 (3.73–5.95)	0.01 (0.00–0.04)	0.67 (0.63–0.71)
<i>Западный гнейсовый регион. Норвегия / Western gneiss region. Norway</i>					
19.81 (15.6–23.6)	0.68 (0.50–0.90)	12.86 (10.1–15.3)	4.61 (4.10–5.12)	0.01 (0.00–0.03)	0.54 (0.43–0.64)
<i>Террейн Даби-Сулу. В. Китай / Dabi-Sulu terrain. E China</i>					
18.44 (17.3–21.4)	0.65 (0.55–0.76)	14.18 (12.3–15.0)	3.07 (2.67–3.28)	0.92 (0.32–1.33)	0.58 (0.51–0.61)
<i>Террейн Алтын-Таг. С.-З. Китай / Altyn-Tag terrain. NW China</i>					
15.72 (13.7–18.9)	0.28 (0.05–0.52)	13.78 (11.8–15.9)	6.30 (5.52–7.3)	0.25 (0.01–1.25)	0.61 (0.53–0.67)
Мантийные гранатовые УНР-перидотиты / Mantle garnet UHP-peridotites					
9.32 (5.6–11.6)	0.46 (0.01–0.87)	19.67 (17.8–22.92)	4.71 (3.51–6.40)	2.16 (0.56–4.84)	0.79 (0.74–0.88)

Примечание. Значения рассчитаны с использованием данных из табл. 1. Содержания оксидов в мас. %. Цифра над скобками — среднее значение, в скобках — минимум и максимум. #Mg = Mg/(Mg+Fe) — магнезиальность.

Note. Statistical results based on data from tab.1 Oxides in weight %. Date above brackets is average value, in brackets are minimum and maximum value. #Mg = Mg/(Mg+Fe).



2) блочностью/пятнистостью (наличием химически контрастных доменов внутри кристалла); 3) изменением состава граната вдоль трещин. При этом блочность и изменения вдоль трещин связаны с образованием Grt-4.

Прогрессивная зональность граната (Grt-1 → Grt-2, рис. 3, а; 4) выражается в снижении (от центра к краю) содержания MnO, FeO, CaO и возрастании MgO и магнезиальности $\#Mg = (Mg+Fe)/Mg$. Порфириобласты с такой зональностью обнаружены только в одном образце (обр. 790/4). Регрессивная зональность (Grt-2 → Grt-3 → Grt-4, рис. 3, б; 4) проявлена во всех образцах перидотитов и выражается в снижении содержания MgO и $\#Mg$ и возрастании MnO, FeO, CaO.

По соотношению MgO и FeO между Grt-2, Grt-3 и Grt-4 образцы ультрамафитов объединены в две группы (рис. 4):

I группа — образцы с наиболее магнезиальным гранатом трёх генераций:

Grt-2: MgO >> FeO ($\#Mg = 0.68-0.71$), CaO = 4.75–6.84 мас. %, Grt-3: MgO > FeO ($\#Mg = 0.64-0.69$), CaO = 5.12–6.75 мас. %, Grt-4: MgO ≈ FeO ($\#Mg = 0.61-0.66$), CaO = 7.16–11.04 мас. %.

II группа с гранатом менее магнезиальным:

Grt-2: FeO ≈ MgO ($\#Mg = 0.64-0.66$), CaO = 4.98–5.82 мас. %, Grt-3: FeO > MgO ($\#Mg = 0.57-0.61$), CaO = 4.69–6.54 мас. %, Grt-4: FeO >> MgO ($\#Mg = 0.55-0.63$), CaO = 7.17–9.11 мас. %.

Несмотря на некоторые различия в содержании главных компонентов, гранаты двух групп имеют подобные тренды в изменении химического состава с изменением термодинамических условий (рис. 4, а). Более подробное описание зональности приведено в работе [7], количественный анализ гранатов из некоторых образцов представлен ранее [6].

Химическая специфика гранатов из ультрамафитов Марун-Кей в сравнении с гранатами из коровых и мантийных УНР-перидотитов коллизионных зон мира

Литературные аналитические данные, использованные для сравнения с данными по гранатам из перидотитов Марун-Кей, представлены в табл. 1. Генетический тип коровых перидотитов представлен гранатовыми ультрамафитами Кокчетавского массива (С. Казахстан), террейна Даби (В. Китай), террейна Алтын-Таг (С.-З. Китай) и Западного гнейсового региона (Норвегия). Они сравнивались с представителями мантийных гранатовых перидотитов из террейна Сулу (В. Китай), Западного гнейсового региона (Норвегия), перидотитовых комплексов Центральных и Западных Альп, Бланского массива (Чехия) и острова Сулавеси (Индонезия).

Статистические данные по составу гранатов коровых и мантийных перидотитов представлены в табл. 2. Гранаты коровых перидотитов характеризуются пониженным $\#Mg$ и низким содержанием Cr_2O_3 в сравнении с гранатами из мантийных УНР-перидотитов. По соотношению Fe и Mg они образуют самостоятельные неперекрывающиеся интервалы: $\#Mg$ «коровых» гранатов изменяется в интервале 0.43–0.71 ($X_{cp} = 0.63$), мантийных — 0.74–0.88 ($X_{cp} = 0.79$). Содержание Cr_2O_3 в «коровых» гранатах — 0.00–1.33 мас. % ($X_{cp} = 0.12$ мас. %), в мантийных — 0.56–4.84 мас. % ($X_{cp} = 2.16$ мас. %). Содержание Cr_2O_3 в гранатах из коровых перидотитов террейна Даби существенно выше, чем в гранатах из коровых перидотитов Кокчетавы, Норвегии, террейна Алтын-Таг, и частично перекрывается с составами гранатов мантийных перидотитов. Если

кокчетавские и норвежские «коровые» гранаты практически лишены Cr_2O_3 , то в «коровых» гранатах Китая из террейна Даби содержание Cr_2O_3 составляет 0.32–1.33 мас. %. В китайских «коровых» гранатах из террейна Алтын-Таг содержание Cr_2O_3 составляет 0.01–0.17 мас. % (одно значение 1.25 мас. %).

На бинарных диаграммах Mg—Fe и $\#Mg$ — Cr_2O_3 (рис. 5, а, б) показан состав пикового граната (Grt-2) из ультрамафитов Марун-Кей в сравнении с мантийными и коровыми перидотитами; на тройной диаграмме Mg—Fe—Ca (рис. 6) вынесены составы всех четырех генераций граната. По содержанию Mg, Fe и Cr гранаты из марункеуских ультрамафитов отличаются от гранатов из мантийных УНР-перидотитов: они менее магнезиальны, содержат меньшее количество Cr и расположены в поле гранатов из коровых перидотитов. $\#Mg$ пикового Grt-2 в перидотитах Марун-Кей варьирует в интервале 0.60–0.71, содержание Cr_2O_3 — от 0.00 до 0.20, редко до 0.44 мас. %. По значению $\#Mg$ марункеуские гранаты практически полностью перекрываются с гранатами из коровых ультрамафитов Кокчетавского массива, а по концентрации Cr_2O_3 — с гранатами из коровых ультрамафитов террейна Алтын-Таг.

Обсуждение

Наличие в гранатовых перидотитах реликтового плагиоклаза прямо указывает на начальное (досубдукционное) давление ниже 7–8 кбар, т. е. становление магматических протолитов происходило именно в коровых условиях — в верхней коре на глубинах свыше 21–24 км. На рис. 2 показан РТ-тренд метаморфической (прогрессивной и регрессивной) эволюции перидотитов комплекса: пунктирными стрелками показан предполагаемый РТ-путь от момента становления интрузива в земной коре (субизобарическое остывание интрузива — стрелка с цифрой 1) до начала погружения при субдукции (прогрессивный метаморфизм с повышением Р и Т — стрелка с цифрой 2). Подобная РТ-эволюция установлена для коровых протолитов гранатовых перидотитов Биксинг и Маобей в террейне Даби (В. Китай) [29 и ссылки в ней].

Коровые перидотиты сходны с мантийными по количественно-минералогическому составу, однако заметно отличаются от них химическим составом минералов [8], например составом граната (рис. 5, б). На рис. 7 показаны РТ-условия пика УНР-метаморфизма для коровых и мантийных гранатовых перидотитов из различных коллизионных зон земного шара (по данным из табл. 1). Почти все оценки максимальных Р и Т для коровых и мантийных гранатовых перидотитов находятся в поле устойчивости коэсита или алмаза и практически полностью перекрываются, за исключением РТ-данных по гранатовым перидотитам Сулавеси, образовавшимся при значительно более высоких температурах. Близкие РТ-параметры указывают на то, что разница в химизме «коровых» и «мантийных» гранатов обусловлена не термодинамическими условиями, а скорее спецификой петрохимического состава перидотитов разных генетических типов. Существенные отличия петрохимического состава марункеуских ультрамафитов от мантийных и сходство с петрохимией коровых перидотитов приведены в работе [6].

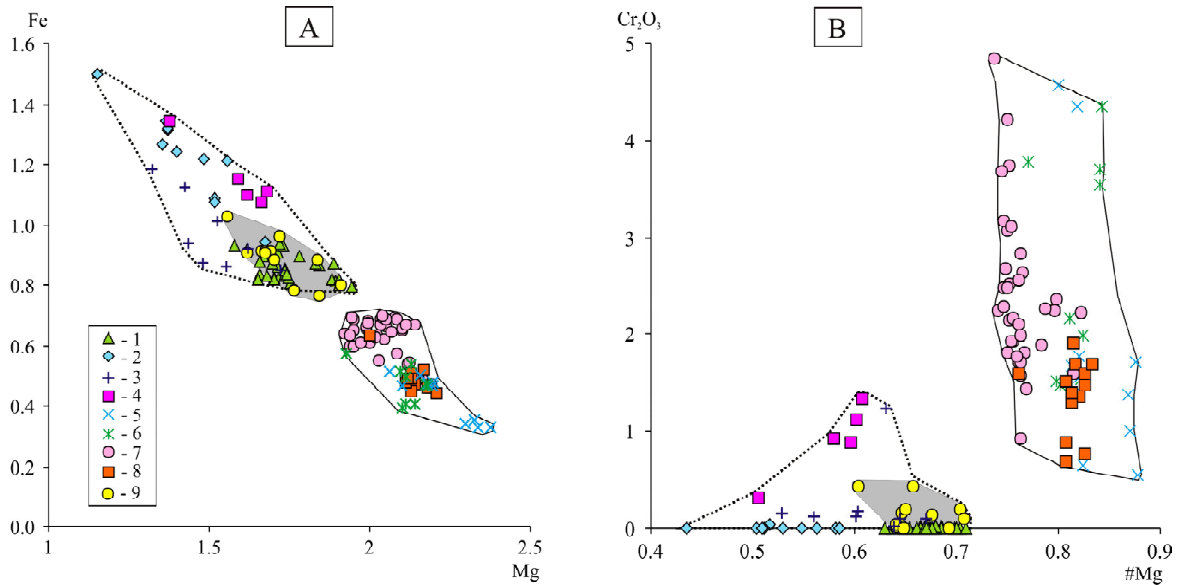


Рис. 5. Сравнение состава гранатов из перidotитов Марун-Кеу с гранатами из мантийных и коровых UHP-UHP-перidotитов коллизионных зон мира: 1—4 — коровые перidotиты: 1 — Кокчетавский массив, С. Казахстан, 2 — гнейсовый регион, 3. Норвегия, 3 — террейн Алтын-Таг, С.-З. Китай, 4 — террейн Даби, В. Китай; 5—8 — мантийные перidotиты: 5 — гнейсовый регион, 3. Норвегия, 6 — перidotиты Европы (Бланский массив и комплекс Альпе Арами), 7 — террейн Сулу, В. Китай, 8 — о-в Сулавеси, Индонезия; 9 — гранатовые перidotиты Марун-Кеу. Серым полем выделена область гранатов из перidotитов комплекса Марун-Кеу, точечной и сплошной линиями — поля составов граната соответственно из коровых и мантийных перidotитов. Ссылки на источники см. в табл. 1. Содержание Cr_2O_3 — в мас. %; Fe и Mg — в формульных коэффициентах

Fig. 5. Comparison of garnet composition from Marun-Keu peridotites with garnet from mantle and crustal HP-UHP-peridotites from other collision zones: 1—4 — crustal peridotites: 1 — Kokchetav Massif, N. Kazakhstan, 2 — Gneiss Region, W. Norway, 3 — Altyn Tagh terrane, NW China, 4 — Dabie-Sulu terrane, E. China; 5—8 — mantle peridotites: 5 — Gneiss Region, W. Norway, 6 — Europe (Blansky Massif and Complex Alpe Arame), 7 — Dabie-Sulu terrane, E. China, 8 — Sulawesi Island, Indonesia; 9 — peridotites of Marun-Keu Complex. Grey field — fields of garnets from Marun-Keu peridotites; dotted and solid contours — fields of garnets from crustal and mantle peridotites. Data for composition of garnet from crustal and mantle peridotites from Tab. 1. Cr_2O_3 concentration in wt. %; Fe and Mg — in formula coefficients

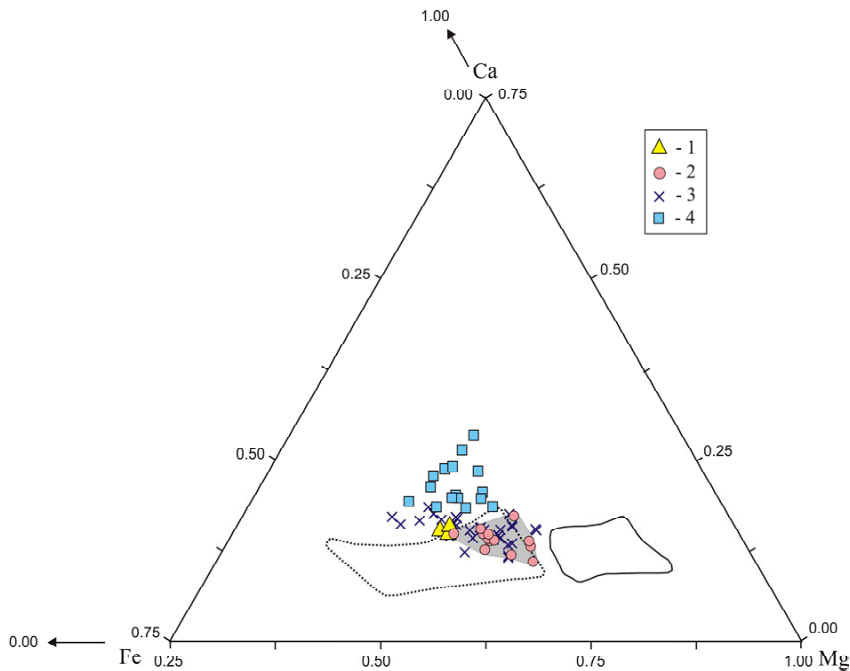


Рис. 6. Тройная диаграмма Mg—Fe—Ca для гранатов из перidotитов Марун-Кеу: 1—4 — гранат из перidotитов Марун-Кеу, соответственно Grt-1, Grt-2, Grt-3, Grt-4. Точечной и сплошной линиями показаны поля составов граната из коровых и мантийных перidotитов соответственно. Ссылки на источники см. в табл. 1

Fig. 6. Mg-Fe-Ca diagram for garnet from Marun-Keu peridotites: 1—4 - Grt-1, Grt-2, Grt-3, Grt-4 respectively. Dotted and solid contours — composition fields of garnet from crustal and mantle peridotites, after Tab. 1

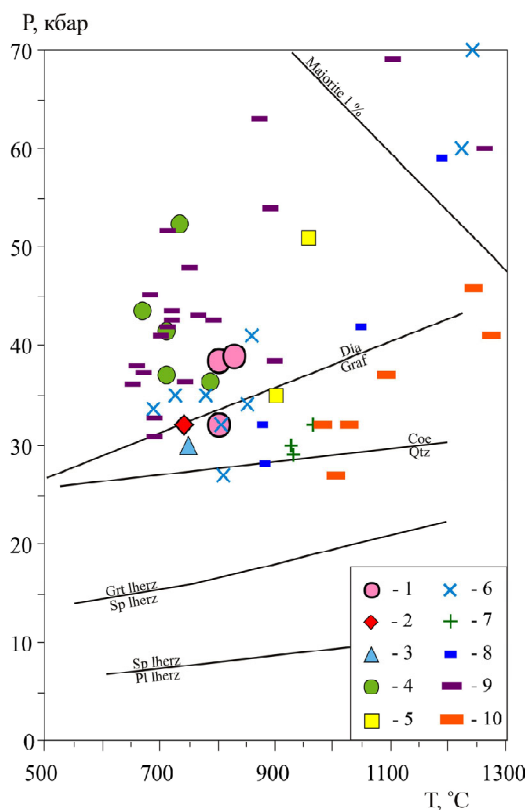


Рис. 7. РТ-параметры пика метаморфизма коровых и мантийных УНР-гранатовых перидотитов из коллизионных зон мира: 1–5 — коровые перидотиты: 1 — комплекс Марун-Кеу, Полярный Урал, Россия; 2 — Кокчетавский массив, С. Казахстан; 3 — западный гнейсовый регион, Норвегия; 4 — террейн Даби, В. Китай; 5 — террейн Алтын-Таг, С.-З. Китай; 6–10 — мантийные перидотиты: 6 — западный гнейсовый регион, Норвегия; 7 — Бланский массив, Чехия; 8 — комплекс Альпе Арами, 3. Альпы, Италия; 9 — террейн Сулу, В. Китай; 10 — о-в Сулавеси, Индонезия. Ссылки на источники см. в табл. 1. Линии минеральных равновесий см. на рис. 2. РТ-линия первого появления граната с 1 % мейджоритового минала по данным [16]

Fig. 7. Peak metamorphic P-T parameters of crustal and mantle UHP-peridotites from different collision zones: 1–5 — crustal peridotites: 1 — Marun-Keu Complex, Polar Urals; 2 — Kokchetav Massif, N. Kazakhstan; 3 — Western Gneiss Region, Norway; 4 — Dabie terrane, E. China; 5 — Altyn Tagh terrane, N.-W. China; 6–10 — mantle peridotites: 6 — Western Gneiss Region, Norway; 7 — Blansky Massif, Czech Republic; 8 — Alpe Arami Complex, W. Alps, Italy; 9 — Sulu terrane, E. China; 10 — Sulawesi Island, Indonesia. Data are from Tab. 1. Lines of mineral equilibrium see Fig. 2. Line with 1 % of majorite in garnet is after [16]

Заключение

Геологические наблюдения, а именно наличие реликтовых участков низкобарических плагиоклазосодержащих протолитов в гранатовых перидотитах, прямо указывают на их изначально коровое происхождение. Гранат из ультрамафитов Марун-Кеу по составу сопоставляется с гранатами коровых УНР-ультрамафитов коллизионных зон Казахстана, Норвегии и Китая. Термобарометрические сопоставления условий образования перидотитов (рис. 7) показывают, что разница в составе пиковых гранатов из перидотитов двух генетических типов определяется не РТ-условиями их образования. Таким образом, гранат коровых перидотитов, являясь метаморфическим минералом, отражает валовый состав магматических протолитов и может служить индикатором корового генезиса ультрамафитов в УНР-коллизионных зонах.

Геологические данные и результаты сопоставлений химического состава граната позволили отнести гранатомые ультрамафиты Марун-Кеу к генетическому типу коровых перидотитов. Их досубдукционными предшественниками являются плагиоидотиты и меланотроктолиты, сохранившиеся при УНР-метаморфизме в виде реликтовых участков в телах гранатовых перидотитов.

Авторы благодарят анонимных рецензентов за критические замечания, позволившие существенно улучшить статью.

Работа выполнена в рамках государственного задания (проект № 0330-2016-0004) и программы фундаментальных исследований РАН № 15-18-5-57.

Литература

1. Душин В. А., Сердюкова О. П., Малюгин А. А. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200000. Издание второе. Серия Полярно-Уральская. Листы Q-42-I, П. Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2007. 340 с.

2. Куликова К. В., Варламов Д. А. Эклогит-гнейсовый комплекс хребта Марун-Кеу // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы совещания. Иркутск: Институт земной коры СО РАН. 2014. Вып. 12. С. 177–179.

3. Куренков С. А., Симонов В. А., Шацкий В. С., Скляр Е. В., Ступаков С. И., Тикун Ю. В. Очерки по региональной тектонике // Труды геол. ин-та. Вып. 561. Т. 2.: Казахстан, Тянь-Шань, Полярный Урал. М.: Наука, 2005. С. 130–157.

4. Ревердатто В. В., Селятицкий А. Ю. Оливин-гранатовые, оливин-шпинелевые и ортопироксеновые метаморфические породы Кокчетавского массива, Северный Казахстан // Петрология. 2005. Т. 13. № 6. С. 564–591.

5. Ревердатто В. В., Селятицкий А. Ю., Карсвелл Д. Геохимические различия «мантийных» и «коровых» перидотитов/пироксенитов в метаморфических комплексах высоких/сверхвысоких давлений // Геология и геофизика. 2008. Т. 49. № 2. С. 99–119.

6. Селятицкий А. Ю., Куликова К. В. Первые данные о проявлении УНР-метаморфизма на Полярном Урале // Доклады РАН. 2017. Т. 476. № 6. С. 681–684.

7. Селятицкий А. Ю., Куликова К. В. Эволюция химического состава граната при метаморфизме перидотитов УНР-комплекса Марун-Кеу, Полярный Урал // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. 2017. № 8. С. 36–43.

8. Селятицкий А. Ю., Ревердатто В. В. Сравнение составов клинопироксенов, гранатов и шпинелей из мантийных и «коровых» перидотитов коллизионных зон высоких/сверхвысоких давлений // Доклады РАН. 2011. Т. 441. № 5. С. 674–681.

9. Удовкина Н. Г. Эклогиты Полярного Урала. М.: Наука, 1971. 191 с.



10. Уляшева Н. С., Ронкин Ю. Л. Химический состав и геодинамические обстановки формирования протолитов амфиболитов и алмандиновых эклогитов марункеуского комплекса (Полярный Урал) // Изв. Коми НЦ УрО РАН. 2014. Вып. 1(17). 71—79.
11. Brueckner H. K., Medaris L. G. A general model for the intrusion and evolution of «mantle» garnet peridotites in high-pressure and ultrahigh-pressure metamorphic terranes // *J. Metam. Geol.* 2000. V. 18. P. 123—133.
12. Carswell D. A., Harvey M. A., Al-Samman A. The Petrogenesis of constraining Fe-Ti and Mg-Cr garnet peridotite types in the high grade gneiss complex of Western Norway // *Bull. Mineral.* 1983. V. 106. P. 727—750.
13. Coleman R. G., Wang X. Overview of the geology and tectonics of UHPM / In: Coleman, R. G., Wang, X. (Eds.), *Ultrahigh pressure metamorphism*. Cambridge University Press, Cambridge, 1995, p. 1—32.
14. Ernst W. G. Petrochemical study of lherzolitic rocks from the Western Alps // *J. Petrology*. 1978. V. 19. P. 341—392.
15. Ernst W. G., Piccardo G. B. Petrogenesis of some Ligurian peridotites: I. Mineral and bulk-rock chemistry // *Geoch. Cosm. Acta*. 1979. V. 43. P. 219—327.
16. Gasparik T. Phase Diagrams for Geoscientists — An Atlas of the Earths Interior. Springer, Berlin. 2003. 467 p.
17. Helmerts H., Maaskant P., Hartel T. H. D. Garnet peridotite and associated high-grade rocks from Sulawesi, Indonesia // *Lithos*. 1990. V. 25. P. 171—188.
18. Kadarusman A., Parkinson C. D. Petrology and PT-evolution of garnet peridotites from central Sulawesi, Indonesia // *J. Metam. Geol.* 2000. V. 18. P. 193—209.
19. Larikova T. L., Zaraisky G. P. Experimental modelling of corona textures // *J. Metam. Geol.* 2009. V. 27. P. 139—151.
20. Lopez-Carmona A., Tishin P. A., Chernyshov A. I. et al. // *Петрология магматических и метаморфических комплексов: Материалы VIII Всероссийской петрографической конференции*. Вып. 8. Томск: ТГУ. 2016. С. 26—30.
21. Malaspina N, Poli S., Fumagalli P. The oxidation state of metasomatized mantle wedge: insights from C-O-H-bearing garnet peridotite // *Jour. Petrol.* 2009. V. 50. Is. 8. P. 1533—1552.
22. Molina J. F., Austrheim H., Glodny J., Rusin A. The eclogites 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.
23. Naemura K., Hirajima T., Svojtka M. The pressure-temperature path and the origin of phlogopite in spinel-garnet peridotites from the Blansky les massif of the Moldanubian zone, Czech Republic // *J. Petrology*. 2009. V. 50. P. 1795—1827.
24. Paquin J., Altherr R. New constraints on the P-T evolution of the Alpe Arami garnet peridotite body (Central Alps, Switzerland) // *J. Petrol.* 2001. V. 42. N. 6. P. 1119—1140.
25. Van Roermund H. L. M., Drury M. R., Barnhoorn A., de Ronde A. A. Super-silicic garnet microstructures from an orogenic garnet peridotite, evidence for an ultra-deep (>6 GPa) origin // *J. Metam. Geol.* 2000. V. 18. P. 135—147.
26. Wang C., Liu L., Chen D. L., Cao Y. T. Petrology, geochemistry, geochronology and metamorphic evolution of garnet peridotites from South Altyn UHP terrane, NW China: Records related to crustal slab subduction and exhumation history. *Ultrahigh-Pressure Metamorphism: 25 years after the discovery of coesite and diamond* (Eds. Dobrzhinetskaya L., Faryad S.W., Wallis S., Cuthbert S.). Amsterdam: Elsevier, 2011. 541—577.
27. Ye K., Song Y. R., Chen Y., Xu H. J., Liu J. B., Sun M. Multistage metamorphism of orogenic garnet-lherzolite from Zhimafang, Sulu UHP terrane, E. China: Implications for mantle wedge convection during progressive oceanic and continental subduction // *Lithos*. 2009. V. 109. P. 155—175.
28. Zheng J., Griffin W. L., O'Reilly S. Y., Yang J., Li T., Zhang M., Zhang R. Y., Liou J.G. Mineral chemistry of peridotites from Paleozoic, Mesozoic and Cenozoic lithosphere: constraints on mantle evolution beneath eastern China // *Jour. Petrol.* 2006. V. 47. N. 11. P. 2233—2256.
29. Zheng J. P., Sun M., Griffin W. L. Age and geochemistry of contrasting peridotite types in the Dabie UHP belt, eastern China: Petrogenetic and geodynamic implications. // *Chem. Geol.* 2008. V. 247. P. 282—304.
30. Zheng J. P., Zhang R. Y., Griffin W.L., Liou J. G., O'Reilly S. Y. Heterogeneous and metasomatized mantle recorded by trace elements in minerals of the Donghai garnet peridotites, Sulu UHP terrane, China // *Chem. Geol.* 2005. V. 221. P. 243—259.

References

1. Dushin V. A., Serdyukova O. P., Malyugin A. A. et al. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii mashtaba 1:200000. Izdanie vtoroe. Seriya Polyarno-Ural'skaya. Listy Q-42-I, II. Ob'yasnitel'naya zapiska* (State geological map of the Russian Federation of scale 1:200000. Second edition. Polar Urals. Sheets Q-42-I,II. Explanatory note). St. Petersburg: VSEGEI, 2007, 340 pp.
2. Kulikova K. V., Varlamov D. A. Eklogit-gneisovy kompleks hrebta Marun-Keu. *Geodinamicheskaya evolyutsiya litosfery Tsentralno-Aziatskogo podvzhnogo poyasa (ot okeana k kontinentu) (Eclogite-gneiss complex of Marun-Keu ridge. Geodynamic evolution of lithosphere of Central-Asia belt): Proceedings*. Irkutsk: Instituty of earth crust. 2014, 12, pp. 177—179.
3. Kurenkov S. A., Simonov V. A., Shatskii V. S., Sklyarov E. V., Stupakov S. I., Tikunov Yu. V. *Ocherki po regionalnoi tektonike (Regional tectonics)*. *Trudy geol. In-ta.* (Proceedings of geological institute). 561, V. 2. Kazakhstan, Tyan-Shan, Polar Urals. Moscow: Nauka, 2005, pp. 130—157.
4. Reverdatto V. V., Selyatitskii A. Yu. *Olivin-granatovye, olivin-shpinelevye i ortopiroksenovye metamorficheskie porody Kokchetavskogo massiva, Severnyi Kazahstan* (Olivini-garnet, olivine-spinel and orthopyroxene metamorphic rocks of Kokchetav massif, North Kazakhstan). *Petrologiya*, 2005, V. 13, No. 6, pp. 564—591.
5. Reverdatto V. V., Selyatitskii A. Yu., Karsvell D. *Geohimicheskie razlichiya «mantiinyh» i «korovyh» peridotitov/piroksenitov v metamorficheskikh kompleksah vysokih/sverhvysokih davlenii* (Geochemical differences of mantle and crustal peridotites piroxenites in metamorphic complexes of high ultrahigh pressures). *Geologiya i geofizika*, 2008, V. 49, No. 2, pp. 99—119.
6. Selyatitskii A. Yu., Kulikova K. V. *Pervye dannye o proyavlenii UHP metamorfizma na Polyarnom Urale* (First data about UHP metamorphism in Polar Urals). *Doklady Earth Sciences*, 2017, V. 476, No. 6, pp. 681—684.
7. Selyatitskii A. Yu., Kulikova K. V. *Evolutsiya himicheskogo sostava granata pri metamorfizme peridotitov UHP-kompleksa Marun-Keu, Polyarnyi Ural* (Evolution of chemical composition of garnet at metamorphism of peridotites of UHP-complex of Marun-Keu, Polar Urals). *Vestnik of Institute of geology Komi SC UB RAS*, 2017, No. 8, pp. 36—43.
8. Selyatitskii A. Yu., Reverdatto V. V. *Sravnenie sostavov klinopiroksenov, granatov i shpinelei iz mantiinyh i «korovyh» peridotitov kollizionnyh zon vysokih / sverhvysokih davlenii* (Comparison of compositions of clynopyroxene, garnets and spinels from mantle and crustal peridotites of collision zones fo high/



- ultrahigh pressures). Doklady Earth Sciences, 2011, V. 441, No. 5, pp. 674–681.
9. Udovkina N. G. *Eklogity Polyarnogo Urala* (Eclogites of Polar Urals). Moscow: Nauka. 1971, 191 pp.
 10. Ulyasheva N. S., Ronkin Yu. L. *Himicheskii sostav i geodinamicheskie obstanovki formirovaniya protolitov amfibolitov i al'mandinovykh eklogitov marunkeusskogo kompleksa (Polyarnyi Ural)* (Chemical composition and geodynamic environments of formation of protoliths of amphibolites and almandine eclogites of marunkeu complex (Polar Urals). Proceedings of Komi SC UB RAS, 2014, 1(17), pp. 71–79.
 11. Brueckner H. K., Medaris L. G. A general model for the intrusion and evolution of «mantle» garnet peridotites in high-pressure and ultrahigh-pressure metamorphic terranes. *J. Metam. Geol.* 2000, V. 18, pp. 123–133.
 12. Carswell D. A., Harvey M. A., Al-Samman A. The Petrogenesis of constraining Fe-Ti and Mg-Cr garnet peridotite types in the high grade gneiss complex of Western Norway. *Bull. Mineral.* 1983. V. 106, pp. 727–750.
 13. Coleman R. G., Wang X. Overview of the geology and tectonics of UHPM. In: Coleman, R. G., Wang, X. (Eds.), *Ultrahigh pressure metamorphism*. Cambridge University Press, Cambridge, 1995, p. 1–32.
 14. Ernst W. G. Petrochemical study of lherzolitic rocks from the Western Alps. / *J. Petrology* 1978, V. 19, pp. 341–392.
 15. Ernst W. G., Piccardo G. B. Petrogenesis of some Ligurian peridotites: I. Mineral and bulk-rock chemistry. *Geoch. Sosm. Acta*, 1979, V. 43, pp. 219–327.
 16. Gasparik T. Phase Diagrams for Geoscientists — An Atlas of the Earth's Interior. Springer, Berlin. 2003, 467 p.
 17. Helmers H., Maaskant P., Hartel T. H. D. Garnet peridotite and associated high-grade rocks from Sulawesi, Indonesia. *Lithos*, 1990, V. 25, pp. 171–188.
 18. Kadarusman A., Parkinson C. D. Petrology and PT-evolution of garnet peridotites from central Sulawesi, Indonesia. *J. Metam. Geol.* 2000, V. 18, pp. 193–209.
 19. Larikova T. L., Zarskiy G. P. Experimental modelling of corona textures. *J. Metam. Geol.* 2009, V. 27, pp. 139–151.
 20. Lopez-Carmona A., Tishin P. A., Chernyshov A. I. et al. *Petrologiya magmaticheskikh i metamorficheskikh kompleksov* (Petrology of magmatic complexes): Proceedings, 8, Tomsk: TSU, 2016, pp. 26–30.
 21. Malaspina N, Poli S., Fumagalli P. The oxidation state of metasomatized mantle wedge: insights from C-O-H-bearing garnet peridotite. *Jour. Petrol.* 2009, V. 50, Is. 8, pp. 1533–1552.
 22. Molina J. F., Austrheim H., Glodny J., Rusin A. The eclogites 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.
 23. Naemura K., Hirajima T., Svojtka M. The pressure-temperature path and the origin of phlogopite in spinel-garnet peridotites from the Blansky les massif of the Moldanubian zone, Czech Republic. *J. Petrology*. 2009, V. 50, pp. 1795–1827.
 24. Paquin J., Altherr R. New constraints on the P-T evolution of the Alpe Arami garnet peridotite body (Central Alps, Switzerland). *J. Petrol.* 2001. V. 42. N. 6, pp. 1119–1140.
 25. Van Roermund H. L. M., Drury M. R., Barnhoorn A., de Ronde A. A. Super-silicic garnet microstructures from an orogenic garnet peridotite, evidence for an ultra-deep (>6 GPa) origin. *J. Metam. Geol.* 2000. V. 18. P. 135–147.
 26. Wang C., Liu L., Chen D. L., Cao Y. T. Petrology, geochemistry, geochronology and metamorphic evolution of garnet peridotites from South Altyn UHP terrane, NW China: Records related to crustal slab subduction and exhumation history. *Ultrahigh-Pressure Metamorphism: 25 years after the discovery of coesite and diamond* (Eds. Dobrzhinetskaya L., Faryad S.W., Wallis S., Cuthbert S.). Amsterdam: Elsevier, 2011, 541–577.
 27. Ye K., Song Y. R., Chen Y., Xu H. J., Liu J. B., Sun M. Multistage metamorphism of orogenic garnet-lherzolite from Zhimafang, Sulu UHP terrane, E. China: Implications for mantle wedge convection during progressive oceanic and continental subduction. *Lithos*. 2009, V. 109, pp. 155–175.
 28. Zheng J., Griffin W. L., O'Reilly S. Y., Yang J., Li T., Zhang M., Zhang R. Y., Liou J.G. Mineral chemistry of peridotites from Paleozoic, Mesozoic and Cenozoic lithosphere: constraints on mantle evolution beneath eastern China. *Jour. Petrol.* 2006, V. 47, No. 11, pp. 2233–2256.
 29. Zheng J. P., Sun M., Griffin W. L. Age and geochemistry of contrasting peridotite types in the Dabie UHP belt, eastern China: Petrogenetic and geodynamic implications. *Chem. Geol.* 2008, V. 247, pp. 282–304.
 30. Zheng J. P., Zhang R. Y., Griffin W.L., Liou J. G., O'Reilly S. Y. Heterogeneous and metasomatized mantle recorded by trace elements in minerals of the Donghai garnet peridotites, Sulu UHP terrane, China. *Chem. Geol.* 2005, V. 221, pp. 243–259.