

# О генетических типах дунитов в ультрамафитах складчатых областей (на примере Урала)

Игорь Степанович ЧАЩУХИН\*

Институт геологии и геохимии им. акад. А. Н. Заварицкого УрО РАН, Россия, Екатеринбург

**Цель работы:** оценка соотношения магматических и метасоматических процессов при формировании дунитов в массивах складчатых областей. Актуальность работы обусловлена необходимостью корректировки легенды при геологическом картировании и при поисках хромитовых руд.

**Методология** проведенной работы: обобщение многолетнего изучения геологического строения, минералогии, петрохимии и геохимии хромитовых ультрамафитов Урала с привлечением мировых петрологических и экспериментальных данных.

**Результаты.** Мантийные ультрамафиты представлены двумя основными типами – подконтинентальным и офиолитовым. Дуниты развиты в обоих типах. Дуниты в подконтинентальных ультрамафитах обнажаются в наиболее эродированных частях массивов. Контакты с вышележащими гарцбургитами и лерцолитами постепенные, что предполагает формирование всего разреза в ходе одноактного процесса с образованием единой дунит-гарцбургит-лерцолитовой серии. Процессом, ответственным за ее формирование, было частичное плавление пиролита мантии, о чем свидетельствуют результаты экспериментов, подтвержденные оригинальными и опубликованными в обширной мировой литературе данными изучения состава породообразующих минералов ультрамафитов. Дуниты следует рассматривать как конечный продукт процесса частичного плавления пиролита мантии. Дуниты офиолитов имеют принципиально иную природу; они образуются по реститам – продуктам частичного плавления и входят в состав двух комплексов: вебстерит-дунитового и габбро-клинопироксенит-дунитового. Дуниты первого комплекса образуются в ходе синкинематической метаморфической дифференциации реститов, второго – как продукт реакции габбро с реститами.

**Выводы.** В строении мантийных ультрамафитов складчатых областей принимают участие три генетических типа дунитов: 1) продукты частичного плавления мантийного пиролита, 2) продукты синкинематической метаморфической дифференциации гарцбургитов, 3) продукты реакции габброидов с гарцбургитами. Приуроченность первых к подконтинентальным ультрамафитам, остальных – к офиолитам свидетельствует о разной геодинамической обстановке формирования ультрамафитов и связанных с ними хромитовых концентраций: уникальные месторождения высокохромистых руд залегают в подконтинентальных ультрамафитах, многочисленные мелкие рудопроявления среднехромистых руд – в офиолитах.

**Ключевые слова:** дунит, частичное плавление, пиролит, рестит, подконтинентальные ультрамафиты, офиолит.

## Введение

Мантийные («альпинотипные» по классификации Ден Текса [1]) ультрамафиты представлены двумя основными типами – подконтинентальным (орогенные ультрамафиты корневых зон) и офиолитовым. Дуниты развиты в обоих типах, но на уровне современного эрозионного среза занимают подчиненное положение относительно других мантийных ультрамафитов – гарцбургитов и лерцолитов.

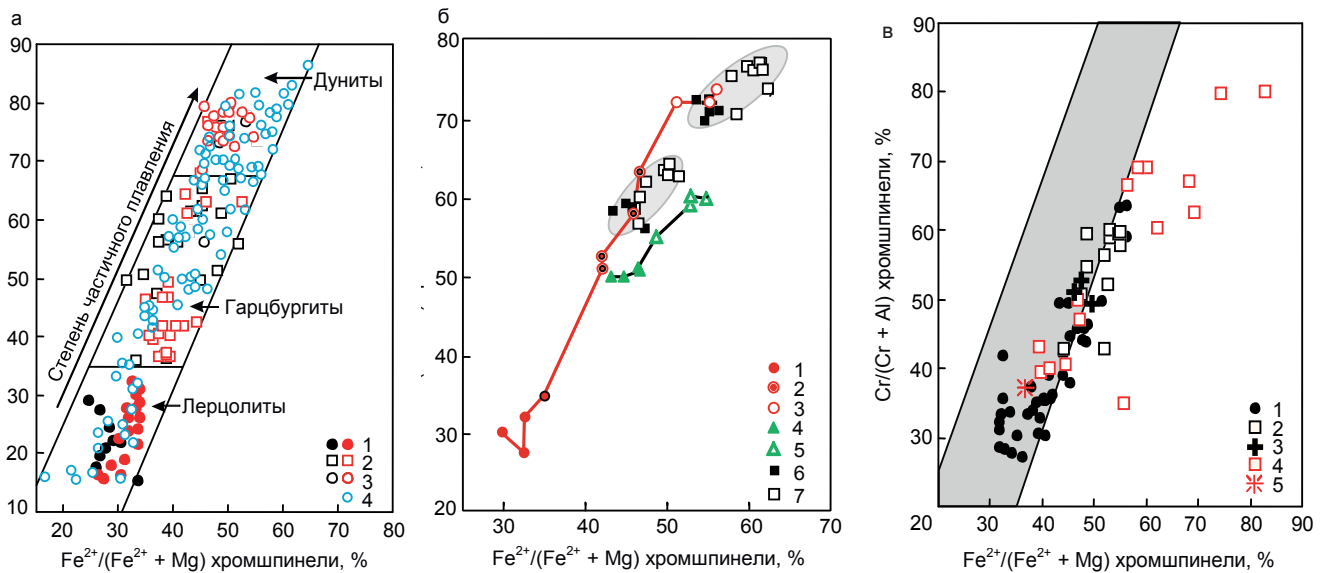
В настоящее время доминирует мнение, что все разнообразие ультрамафитов континентов и океанов есть результат не столько частичного плавления пиролита мантии [2], сколько последующей реакции тугоплавкого остатка с проникающими снизу по гипотетическим дунитовым каналам расплавами преимущественно базитового состава. При этом состав продуктов этой реакции взаимоисключающий. По мнению части исследователей, в ходе инкогруэнтного плавления или взаимодействия с недосыщенной кремнеземом магмой происходит растворение пироксенов и кристаллизация оливина [3–5], по мнению других, эта реакция сопровождается кристаллизацией пироксенов за счет оливина в ассоциации (в зависимости от давления) с шпинелью, гранатом или плагиоклазом [6–8]. Таким образом, в результате реакционного взаимодействия первого типа происходит дальнейшее истощение ультрамафитов глиноземом, известью и кремнекислотой, в результате второй реакции – обогащение этими элементами. П. Келемен утверждает, что при образовании офиолитовых и подконтинентальных ультрамафитов реакционно-мантийный процесс может быть не только главным, но и единственным [3].

## Результаты

В ненарушенных тектоникой и денудацией массивах подконтинентальных ультрамафитов дуниты слагают наиболее глубинные части разрезов (например, массивы Средний Крака, Нурали и юго-восточный блок Кемпирсайского массива на Южном Урале [9]; массив Хороман, Япония [10]). В первых двух обнажается, а во вторых вскрыт глубокими скважинами полный разрез сверху вниз: плагиоклазовые лерцолиты–шпинелевые лерцолиты–гарцбургиты–дуниты. В большинстве случаев на поверхности наблюдается средняя часть разреза, сложенная шпинелевыми лерцолитами и гарцбургитами, плагиоклазовые лерцолиты обычно либо полностью отсутствуют (Узянский Крака), либо образуют линзы, встроенные в структуру шпинелевых лерцолитов. Дуниты обнажаются в наиболее эродированных частях массивов: например, в восточной части Нуралинского массива и в юго-западной части Среднего Крака. Контакты между ультрамафитами постепенные, что предполагает формирование разреза в ходе одноактного процесса, итогом которого стало образование единой дунит-гарцбургит-лерцолитовой серии.

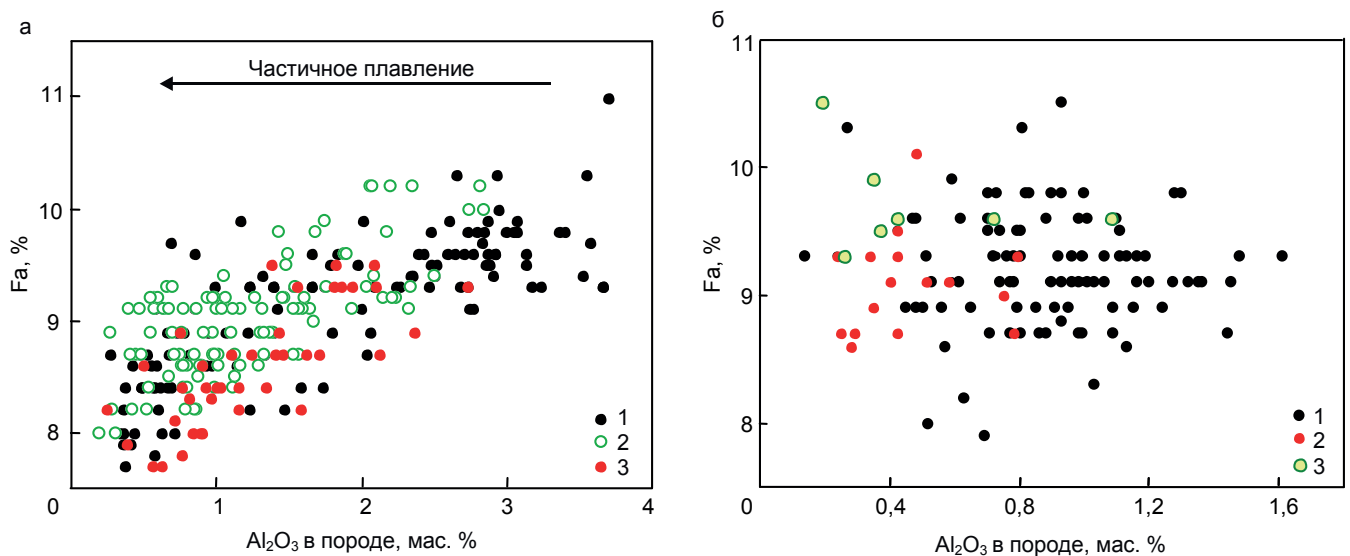
Таким процессом, несомненно, было частичное плавление пиролита мантии, о чем свидетельствуют результаты экспериментов [11–13], подтвержденные оригинальными и опубликованными в обширной мировой литературе данными изучения состава породообразующих минералов подконтинентальных ультрамафитов (например, [10, 14–16 и др.]). В ходе частичного плавления пиролита мантии базальтоидные выплавки экстрагируют большую часть легкоплавких компонентов –  $Al_2O_3$ , CaO,  $SiO_2$ , щелочей и редкоземельных элементов, в тугоплавком остатке накапливаются MgO, NiO,

\* ✉ chashchukhin@igg.uran.ru  
 <http://orcid.org/0000-0001-8029-0260>



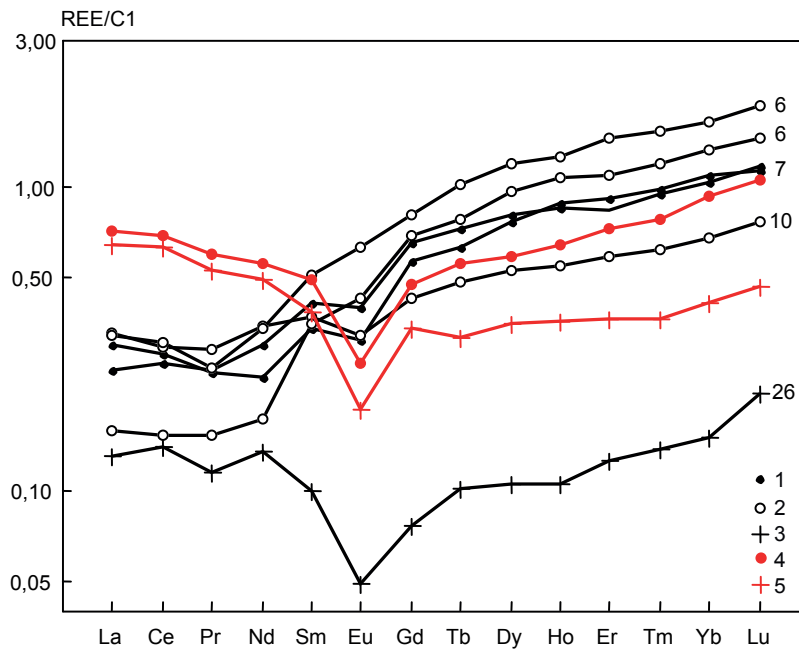
**Рисунок 1. Составы акцессорной хромшпинели в уральских ультрамифитах.** а – 1–3 – подконтинентальная дунит-гарцбургит-лерцолитовая серия, массивы Нурали и Средний Крака соответственно: 1 – шпинелевые лерцолиты, 2 – гарцбургиты, 3 – дуниты, 4 – дунит-гарцбургит-лерцолитовая серия юго-восточного блока Кемпирсайского массива; б – 1–3 – 30-сантиметровый микроразрез через дунит-гарцбургит-лерцолитовую серию юго-восточного блока Кемпирсайского массива, месторождение Алмаз-Жемчужина, скв. 245, глубина 1159 м: 1 – лерцолиты, 2 – гарцбургиты, 3 – дуниты; 4–5 – 30-сантиметровый микроразрез через контакт жилы метасоматического дунита с гарцбургитом Войкаро-Сыньинского массива, долина притока р. Хойлы: 4 – гарцбургит, 5 – дунит; 6–7 – два микроразреза (закрашенные эллипсы) через контакты жил метасоматических дунитов с гарцбургитами Алапеевского массива, Курмановское месторождение хромитов: 6 – гарцбургиты, 7 – дуниты; в – Войкаро-Сыньинский массив: 1–3 – внутренняя часть: 1 – гарцбургиты, 2 – апогарцбургитовые дуниты, 3 – хромититы; 4–5 – краевой комплекс: 4 – дуниты, 5 – хромититы. Серое поле – поле составов подконтинентальной дунит-гарцбургит-лерцолитовой серии (рис. 1, а).

**Figure 1. Compositions of accessory chromspinel in the Ural ultramafites.** а – 1–3 – subcontinental dunite-harzburgite-lherzolite series, Nurali and Middle Kraka massifs respectively: 1 – spinel lherzolites, 2 – harzburgites, 3 – dunites, 4 – dunite-harzburgite-lherzolite series of the south-eastern block of the Kempirsai massif; б – 1–3 – 30-centimeter micro-section through the dunite-harzburgite-lherzolite series of the southeastern block of the Kempirsai massif, Almaz-Zhemchuzhina deposit, well. 245, depth is 1159 m: 1 – lherzolites, 2 – harzburgites, 3 – dunites; 4–5 – 30-centimeter microsection through the contact of a metasomatic dunite vein with a harzburgite of the Voikar-Syninsky massif, valley of the Hoily river: 4 – harzburgite, 5 – dunite; 6–7 – two microsections (filled ellipses) through the contacts of metasomatic dunites veins with the harzburgites of the Alapayevsky massif, the Kurmanovo chromite deposit: 6 – harzburgites, 7 – dunites; в – Voikar-Syninsky massif: 1–3 – the inner part: 1 – harzburgites, 2 – apoharzburgite dunites, 3 – chromite; 4–5 – marginal complex: 4 – dunites, 5 – chromitites. The gray field is the field of compositions of the subcontinental dunite-harzburgite-lherzolite series (Fig. 1, а).



**Рисунок 2. Соотношения величин железистости оливина Fa и содержаний глинозема в ультрамифитах Урала.** а – дунит-гарцбургит-лерцолитовые серии массивов: 1 – Нуралинского, 2 – Южного Крака, 3 – Кемпирсайского, юго-восточный блок; б – Войкаро-Сыньинский массив: 1 – гарцбургиты, 2, 3 – дуниты: 2 – сетчатого комплекса, 3 – краевые.

**Figure 2. The ratio of the ferruginosity values of Fa olivine and alumina content in ultramafite rocks of the Urals.** а – dunite-harzburgite-lherzolite series of massifs: 1 – Nuralinsky, 2 – South Kraka, 3 – Kempirsai, southeast block; б – Voikar-Syninsky massif: 1 – harzburgites, 2, 3 – dunites: 2 – reticulated group, 3 – marginal.



**Рисунок 3. Нормированные на хондрит спектры составов редких земель в ультрамафитах Урала.** 1–3 – Нуралинский массив: 1 – шпинелевые лерцолиты, 2 – плагиоклазовые лерцолиты, 3 – дунит; 4, 5 – Войкаро-Сынынский массив: 4 – несерпентинизированный лерцолит, 5 – несерпентинизированный дунит. Цифры – степень частичного плавления.

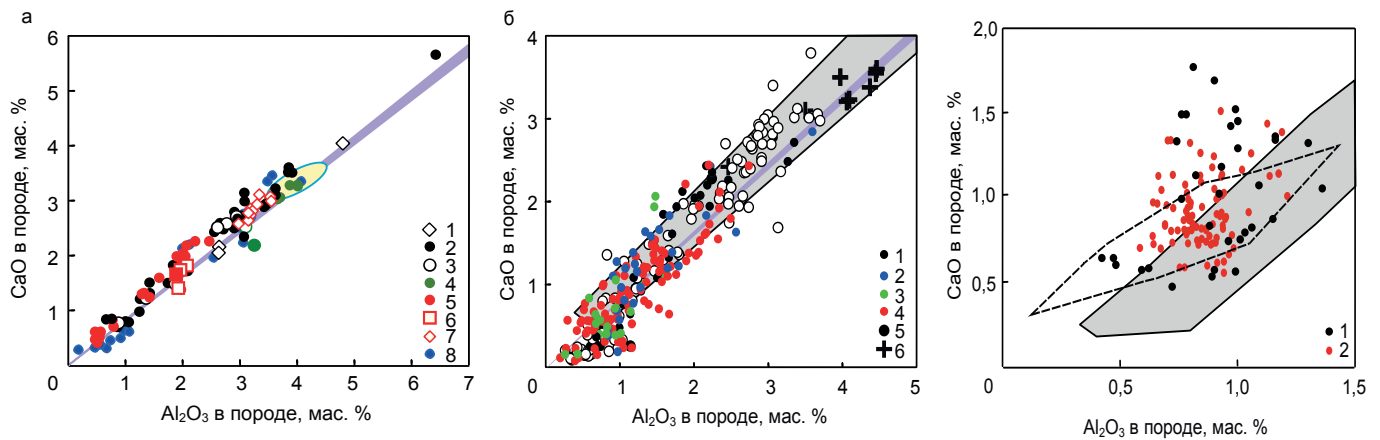
**Figure 3. Spectra of rare-earth compositions in ultramafic rocks of the Urals sized for chondrite.** 1–3 – Nuralinsky massif: 1 – spinel lherzolites, 2 – plagioclase lherzolites, 3 – dunite; 4, 5 – Voikar-Syninsky massif: 4 – non-serpentinized lherzolite, 5 – non-serpentinized dunite. The numbers are the degree of partial melting.

Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. В итоге величина хромистости (Cr/(Cr + Al)) акцессорной хромшпинели последовательно увеличивается от 15–35 % в лерцолитах до 35–65 % в гарцбургитах и далее вплоть до 85 % в дунитах; важно то, что данная закономерность прослеживается не только статистически (рис. 1, а), но и пространственно (рис. 1, б). За счет накопления в рестите MgO и относительно инертного поведения железа постепенно снижается железистость (Fe<sup>2+</sup>/(Fe<sup>2+</sup> + Mg) главного породообразующего минерала ультрамафитов – оливина, от 9,5–11 % в лерцолитах до 7,7–8,5 % в дунитах (рис. 2, а). В ходе процесса концентрации наиболее инертных тугоплавких РЗЭ уменьшаются в 4 раза [16]. Уральские данные подтверждают этот вывод: содержание тяжелых лантаноидов в ряду лерцолит–дунит уменьшается на полпорядка (рис. 3).

Непрерывность изменения состава минералов подконтинентальных ультрамафитов в соответствии с экспериментами по частичному плавлению модельного пиrolита мантии не согласуется с изложенной ранее реакционно-метасоматической моделью. Внедрение в ультрамафиты относительно «кислого» базитового вещества в ультрамафитовые реститы должно привести к нарушению первичных соотношений петрогенных компонентов, что в действительности не наблюдается; в действительности эти соотношения соответствуют хондритовым [17] и модельным составам исходного пиrolита [18–23] (рис. 4). Все изложенное позволяет: 1) исключить участие гипотетических базитовых расплавов в формировании подконтинентальных ультрамафитов; 2) рассматривать дуниты как конечный продукт процесса частичного плавления пиrolита мантии.

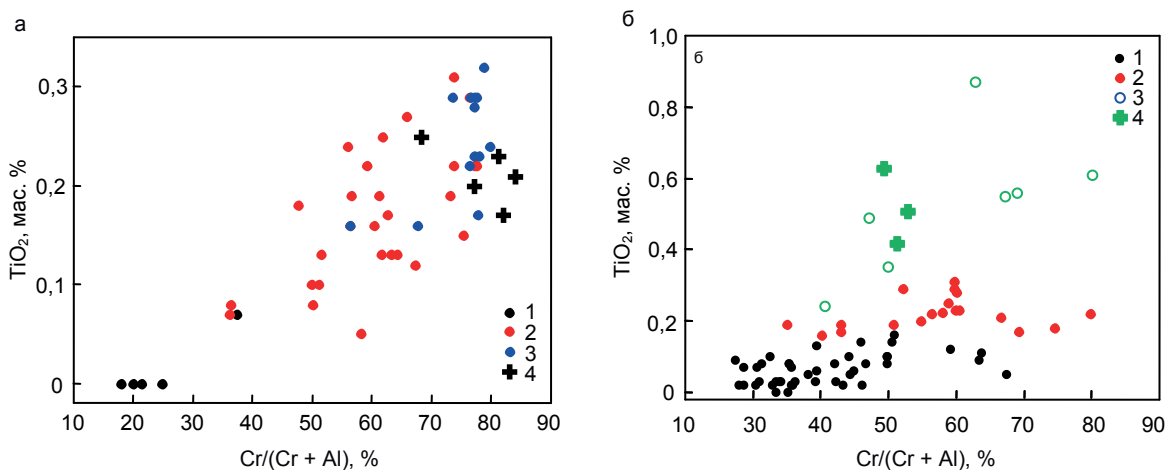
В офиолитовых комплексах продукты частичного плавления представлены слабо дифференцированными гарцбургитами. Лерцолиты, как правило, отсутствуют, а наименее деплетированные ультрамафиты представлены «предельными» гарцбургитами с содержанием первичного клинопироксена не более 5 мас. % – граница между гарцбургитами и лерцолитами [9]. По мере увеличения степени частичного плавления поле составов акцессорной хромшпинели в гарцбургитах относительно подконтинентальных серий смещается в сторону увеличения железистости (рис. 1, в). Это наряду с отклонением от хондритовой величины Al–Ca-отношения (1,22 по [17]) – рис. 4, в – может свидетельствовать о существенно иных условиях процесса.

Дуниты офиолитов входят в состав двух комплексов: вебстерит-дунитового и клинопироксенит-дунитового. Дуниты первого комплекса имеют, несомненно, апогарцбургитовую природу [24]. Они образуют сеть дискордантных относительно директивности и полосчатости вмещающих гарцбургитов жил и протяженных тел, окаймленных жилами и оторочками вебстеритов и ортопироксенитов, реже хромититов. Соотношения размеров дунитовых тел и пироксенитовых оторочек приблизительно соответствуют пропорции оливина и пироксенов в материнских гарцбургитах. Признаки происхождения дунитов как продукта частичного плавления мантийного субстрата отсутствуют. Так, составы акцессорной и рудной хромшпинели в них наследуют состав хромшпинели вмещающего гарцбургита (рис. 1, б, в). Магматические тренды состава оливина (рис. 2, а) не выражены: величина железистости оливина в дунитах аналогична гарцбургитовой (рис. 2, б) – средние величины Fa в гарцбургитах и жильных дунитах одинаковы и равны 9,1 ± 0,4. Нормированные спектры РЗЭ незатронутых серпентинизацией гарцбургита и дунита подобны и в участке легких РЗЭ дискордантны магматическим трендам (рис. 3).



**Рисунок 4. Соотношение извести и глинозема в подконтинентальных ультрамафитах.** а – 1–3 – массив Ронда, Испания [4, 6, 18], фации: 1 – гранатовая, 2 – шпинелевая, 3 – плагиоклазовая, 4 – о. Забаргад, Красное море, шпинелевая фация [25], 5–7 – Хороман, Япония [10], фации: 5 – шпинелевая, 6–7 – плагиоклазовая, тип: 6 – Е, 7 – N; 8 – шпинелевые ультрамафиты массива Лерц, Германия [8]. Эллипс желтого цвета – поле составов пиролита [2, 18–23], желтая полоса – хондриты [17]; б – подконтинентальные ультрамафиты Урала: 1–4 – массивы Крака: 1 – Северный, 2 – Средний, 3 – Узянский, 4 – Южный, 5 – Нуралинский, 6 – модельные составы пиролита мантии. Серое поле – составы ультрамафитов массива Ронда; в – офиолитовые ультрамафиты Урала: 1 – Войкаро-Сыньинский массив, 2 – западный блок Кемпирсайского массива. Штриховой линией околнурено поле составов офиолитов Отриса, Вуриноса, Греция [26] и г. Бурро, США [27].

**Figure 4. The ratio of chalk-stone and alumina in the subcontinental ultramafites.** а – 1–3 – Ronda massif, Spain [4, 6, 18], facies: 1 – garnet, 2 – spinel, 3 – plagioclase, 4 – island Zabargad, Red sea, spinel facies [25], 5–7 – Horoman, Japan [10], facies: 5 – spinel, 6–7 – plagioclase, type: 6 – E, 7 – N; 8 – spinel ultramafites of Lerz massif, Germany [8]. The yellow ellipse is the pyrolite composition field [2, 18–23], the blue bar is chondrite [17]; б – Ural subcontinental ultramafites: 1–4 – Kraka massifs: 1 – North, 2 – Middle, 3 – Usansky, 4 – South, 5 – Nuralinskiy, 6 – model compositions of pyrolite mantle. The gray field is the ultramafic composition of the Ronda massif; в – the Ural ophiolitic ultramafites: 1 – Voikar-Syninsky massif, 2 – West block Kempirsai massif. The dashed line outlines the field of the compositions of the ophiolites of Otris, Vurinos, Greece [26] and the city of Burro, USA [27].



**Рисунок 5. Соотношение концентраций  $TiO_2$  и хромистости хромшпинели в ультрамафитах Нуралинского (а) и Войкаро-Сыньинского (б) массивов.** а – 1 – шпинелевые лерцолиты, 2 – гарцбургиты, 3 – дуниты, 4 – хромититы; б – 1 – гарцбургиты, 2–3 – дуниты: 2 – апогарцбургитового комплекса, 3 – на контакте с клинопироксенит-габбровым комплексом, 4 – хромититы из дунитов этого комплекса.

**Figure 5. The ratio of concentrations of  $TiO_2$  and chromium spinel in ultramafites of Nuralinsky (a) and Voikar-Syninsky (b) massifs.** а – 1 – spinel lherzolites, 2 – harzburgites, 3 – dunites, 4 – chromitites; б – 1 – harzburgites, 2–3 – dunites: 2 – apoharzburgite complex, 3 – in contact with the clinopyroxenite-gabbro complex, 4 – chromitites from dunites of this complex.

Дуниты второго комплекса прослеживаются в хорошо обнаженном Войкаро-Сыньинском массиве (Полярный Урал), окаймляя гарцбургиты с востока и запада в виде прерывистых полос [24]. Тесная пространственная приуроченность дунитов, с одной стороны, к гарцбургитам, с другой – к клинопироксенитам и габброидам может свидетельствовать о реакционно-магматической природе этого типа дунитов. Состав аксессуарной хромшпинели в них отличается от остальных дунитов повышенной величиной хромистости и железистости (рис. 1, в), а также существенно большим содержанием титана (рис. 5, б), состав оливина – большей величиной Fa (рис. 2, б).

Цель настоящей публикации – оценить соотношение магматических и метасоматических процессов при формировании дунитов в подконтинентальных и офиолитовых массивах. Решение задачи имеет важное практическое значение при поисках хромитового оруденения.

**Выводы**

В строении мантийных ультрамафитов складчатых областей принимают участие три генетических типа дунитов: 1) продукты частичного плавления мантийного пиролита, 2) продукты синкинематической метаморфической дифферен-

циации гарцбургитов, 3) продукты реакции габброидов с гарцбургитами. Приуроченность первых к подконтинентальным ультрамафитам, остальных – к офиолитам свидетельствует о разной геодинамической обстановке формирования дунитов и связанного с ними хромитового оруденения: уникальные месторождения высокохромистых руд залегают в подконтинентальных ультрамафитах, многочисленные мелкие рудопроявления среднехромистых руд – в офиолитах [9].

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИГТ УрО РАН (гос. регистрация № ААА-А18-118052590026-5).*

#### ЛИТЕРАТУРА

- Den Tex E. Origin of ultramafic rocks, their tectonic setting and history: A contribution to the discussion of the paper «The origin of ultramafic and ultrabasic rocks» by P. J. Wyllie // *Tectonophysics*. 1969. Vol. 7. P. 457–488. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(69\)90016-X](https://doi.org/10.1016/0040-1951(69)90016-X)
- Рингвуд А. Е. Состав и петрология мантии Земли. М.: Недра, 1981. 584 с.
- Kelemen P., Dick H. J. B., Quick J. Formation of harzburgite by pervasive melt/rock reaction on the upper mantle // *Nature*. 1992. Vol. 358. P. 635–641. <https://doi.org/10.1038/358635a0>
- Van der Wal D., Bodinier J.-L. Origin of the recrystallization front in the Ronda peridotite by km-scale pervasive porous melt flow // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1996. Vol. 122. P. 387–405. <https://doi.org/10.1007/s004100050135>
- Barth M. G., Mason P. R. D., Davies G. R., Dijkstra A. H., Drury M. R. Geochemistry of the Othris Ophiolite, Greece: Evidence for Refertilization? // *J. Petrol.* 2003. Vol. 44, № 10. P. 1759–1785. <https://doi.org/10.1093/petrology/egg058>
- Lenoir X., Garrido C. J., Bodinier J.-L. et al. The Recrystallization Front of the Ronda Peridotite: Evidence for Melting and Thermal Erosion of Subcontinental Lithospheric Mantle beneath the Alboran Basin // *J. Petrol.* 2001. Vol. 42, № 1. P. 141–158.
- Dijkstra A. H., Barth M. G., Drury et al. Diffuse porous melt and melt-rock reaction in the mantle lithosphere at a slow-spreading ridge: A structural petrology and LA-ICP-MS study of the Othris Peridotite Massif (Greece) // *Geochemistry, Geophysics, Geosystem*. 2003. Vol. 4, issue 24. <https://doi.org/10.1029/2001GC000278>
- Le Roux V., Bodinier J.-L., Tommasi A., Alard O. et al. The Lherz spinel lherzolite: Refertilized rather than pristine mantle // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2007. Vol. 259. P. 599–612. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2007.05.026>
- Чашухин И. С., Вотяков С. Л., Шапова Ю. В. Кристаллохимия хромшпинели и окситермобарометрия ультрамафитов складчатых областей. Екатеринбург: Ин-т геологии и геохимии УрО РАН, 2007. 310 с.
- Takazawa E., Frey F. A., Shimizu N., Obata M. Whole rock compositional variations in an upper mantle peridotite (Horoman, Hokkaido, Japan): Are they consistent with a partial melting process? // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2000. Vol. 64, № 4. P. 695–716. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(99\)00346-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00346-4)
- Jaques A. L., Green D. H. Anhydrous melting of peridotite at 0–15 kb pressure and genesis of tholeiitic basalts // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1980. Vol. 73, № 3. P. 287–310. <https://doi.org/10.1007/BF00381447>
- Gaetani G. A., Grove T. L. The influence of water on melting of mantle peridotite // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1998. Vol. 131. P. 323–346. <https://doi.org/10.1007/s004100050396>
- Niida K., Green D. H. Stability and chemical composition of pargasitic amphibole in MORB pyrolite under upper mantle conditions // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1999. Vol. 135. P. 18–40. <https://doi.org/10.1007/s004100050495>
- Arai S. Characterization of spinel peridotites by olivine-spinel compositional relationships: Review and interpretation // *Chemical Geology*. 1994. Vol. 113. P. 191–204. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)90066-3](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)90066-3)
- Downes H. Formation and Modification of the Shallow Sub-continent Lithospheric Mantle: a Review of Geochemical Evidence from Ultramafic Xenolith Suites and Tectonically Emplaced Ultramafic Massifs of Western and Central Europe // *J. Petrol.* 2001. Vol. 42, № 1. P. 233–250. <https://doi.org/10.1093/petrology/42.1.233>
- Niu Y. Bulk-rock Major and Trace Element Compositions of Abyssal Peridotites: Implications for Mantle Melting, Melt Extraction and Post-melting Processes Beneath Mid-Ocean Ridges // *J. Petrol.* 2004. Vol. 45, № 12. P. 2423–2458. <https://doi.org/10.1093/petrology/egh068>
- Palme H., Nickel K. G. Ca:Al ratio and composition of the Earth's upper mantle // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1985. Vol. 49, № 10. P. 2123–2132. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(85\)90070-5](https://doi.org/10.1016/0016-7037(85)90070-5)
- Frey F. A., Suen C. J., Stockman H. W. The Ronda high temperature peridotite: Geochemistry and petrogenesis // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1985. № 49. P. 2469–2491. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(85\)90247-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(85)90247-9)
- Falloon T. J., Green D. Y. Anhydrous partial melting of MORB pyrolite and other peridotite compositions at 10 kb: implications for the origin of primitive MORB glasses // *Mineral. Petrol.* 1987. Vol. 37. P. 181–219.
- Hofmann A. W. Chemical differentiation of the Earth: the relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1988. Vol. 90. P. 297–314. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(88\)90132-X](https://doi.org/10.1016/0012-821X(88)90132-X)
- Ringwood A. E. Phase transformation and their bearing on the constitution and dynamics of the mantle // *Geochim. et Cosmochim. Acta*. 1991. № 55. P. 2083–2110. [http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037\(91\)90090-R](http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037(91)90090-R)
- Allegre C. J., Poirier J. P., Humler E., Hoffman F. W. The chemical composition of the Earth // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1995. Vol. 134. P. 515–526.
- McDonough W. F., Sun S.-S. The composition of the Earth // *Chem. Geol.* 1995. Vol. 120. P. 223–253. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4)
- Савельев А. А., Савельева Г. Н. Войкаро-Сыньинский массив / Петрология и метаморфизм древних офиолитов (на примере Полярного Урала и Западного Саяна). Новосибирск: Наука, 1977. С. 60–91.
- Bonatti E., Ottone G., Hamlyn P. R. Peridotites from the island of Zabargad (St. John), Red Sea: Petrology and geochemistry // *J. Geophys. Res.* 1986. Vol. 91. P. 599–631. <https://doi.org/10.1029/JB091iB01p00599>
- Barth M. G., Mason P. R. D., Davies G. R., Drury M. R. The Othris Ophiolite, Greece: A snapshot of subduction initiation at a mid-ocean ridge // *Lithos*. 2008. Vol. 100. P. 234–254. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.06.018>
- Loney R. A., Himmelberg G. R., Coleman R. G. Structure and petrology of the alpine-type peridotite at Burro Mountain, California, U. S. A. // *J. Petrol.* 1971. Vol. 12. Part 2. P. 245–309. <https://doi.org/10.1093/petrology/12.2.245>

*Статья поступила в редакцию 10 декабря 2018 г.*

# About the genetic types of dunites in folded ultramafites areas (using the Urals as an example)

Igor' Stepanovich CHASHCHUKHIN\*

Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia

**The purpose of work:** estimation of the ratio of magmatic and metasomatic processes during the formation of dunites in arrays of folded areas. The relevance of the work is due to the need to adjust the legend during geological mapping and when searching for chromite ores.

**Methodology** of the work: generalization of a long-term study of the geological structure, mineralogy, petrochemistry, and geochemistry of chromite-bearing ultramafites of the Urals with the involvement of world petrological and experimental data.

**Results.** The mantle ultramafic rocks are represented by two main types – subcontinental and ophiolitic ones. Dunites are developed in both types. Dunites in the subcontinental ultramafites are exposed in the most eroded parts of massifs. Contacts with overlying harzburgites and lherzolites are gradual, which implies the formation of the entire incision during a nonrecurrent process with the formation of a single dunite-harzburgite-lherzolite series. The process responsible for its formation was the partial melting of pyrolite of the mantle, as evidenced by the results of experiments confirmed by the published data studying the composition of rock-forming ultramafite minerals. Dunites should be considered as the final product of the process of partial melting of pyrolite mantle. Dunites of ophiolites have a fundamentally different nature; they are formed according to restites, products of partial melting, and they are part of two complexes: websterite-dunite and gabbro-clinopyroxenite-dunite. Dunites of the first complex are formed during the synkinematic metamorphic differentiation of restites; dunites of the second complex – as a result of the reaction of gabbro with restites.

**Conclusion.** Three genetic types of dunites take part in the structure of mantle ultramafites of folded areas: 1) products of partial melting of mantle pyrolite, 2) products of synkinematic metamorphic differentiation of harzburgites, 3) products of the reaction of gabbroids with harzburgites. The association of the first type with subcontinental ultramafites and the rest with ophiolites indicates the different geodynamic setting for the formation of ultramafites and the associated chromite concentrations: unique deposits of high-chromous ores occur in subcontinental ultramafites; numerous small ore occurrences of medium-chrome ores – in ophiolites.

**Keywords:** dunite, partial melting, pyrolyte, restite, subcontinental ultramafites, ophiolite.

*The work was performed within the framework of the state assignment of the Institute of geology and geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (state registration number AAA-A18-118052590026-5).*

## REFERENCES

- Den Tex E. 1969, Origin of ultramafic rocks, their tectonic setting and history: A contribution to the discussion of the paper «The origin of ultramafic and ultrabasic rocks» by P. J. Wyllie. *Tectonophysics*, vol. 7, pp. 457–488. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(69\)90016-X](https://doi.org/10.1016/0040-1951(69)90016-X)
- Ringwood A. E. 1981, Composition and petrology of the earth's mantle. Moscow, 584 p.
- Kelemen P., Dick H. J. B., Quick J. 1992, Formation of harzburgite by pervasive melt/rock reaction on the upper mantle. *Nature*, vol. 358, pp. 635–641. <https://doi.org/10.1038/358635a0>
- Van der Wal D., Bodinier J.-L. 1996, Origin of the recrystallization front in the Ronda peridotite by km-scale pervasive porous melt flow. *Contrib. Mineral. Petrol.*, vol. 122, pp. 387–405. <https://doi.org/10.1007/s004100050135>
- Barth M. G., Mason P. R. D., Davies G. R., Dijkstra A. H., Drury M. R. 2003, Geochemistry of the Othris Ophiolite, Greece: Evidence for Refertilization? *J. Petrol.*, vol. 44, no. 10, pp. 1759–1785. <https://doi.org/10.1093/petrology/egg058>
- Lenoir X., Garrido C. J., Bodinier J.-L. et al. 2001, The Recrystallization Front of the Ronda Peridotite: Evidence for Melting and Thermal Erosion of Subcontinental Lithospheric Mantle beneath the Alboran Basin. *J. Petrol.*, vol. 42, no. 1, pp. 141–158.
- Dijkstra A. H., Barth M. G., Drury et al. 2003, Diffuse porous melt and melt-rock reaction in the mantle lithosphere at a slow-spreading ridge: A structural petrology and LA-ICP-MS study of the Othris Peridotite Massif (Greece). *Geochemistry, Geophysics, Geosystem*, vol. 4, issue 24. <https://doi.org/10.1029/2001GC000278>
- Le Roux V., Bodinier J.-L., Tommasi A., Alard O. et al. 2007, The Lherz spinel lherzolite: Refertilized rather than pristine mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.*, vol. 259, pp. 599–612. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2007.05.026>
- Chashchukhin I. S., Votyakov S. L., Shchapova Yu. V. 2007, *Kristalokhimiya khromshpineli i oksitermobarometriya ul'tramafitov skladchatykh oblastey* [Crystal chemistry of spinel and oxytermobarometry of ultramafites of folded regions]. Ekaterinburg, 310 p.
- Takazawa E., Frey F. A., Shimizu N., Obata M. 2000, Whole rock compositional variations in an upper mantle peridotite (Horoman, Hokkaido, Japan): Are they consistent with a partial melting process? *Geochim. Cosmochim. Acta*, vol. 64, no. 4, pp. 695–716. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(99\)00346-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00346-4)
- Jaques A. L., Green D. H. 1980, Anhydrous melting of peridotite at 0–15 kb pressure and genesis of tholeiitic basalts. *Contrib. Mineral. Petrol.*, vol. 73, no. 3, pp. 287–310. <https://doi.org/10.1007/BF00381447>
- Gaetani G. A., Grove T. L. 1998, The influence of water on melting of mantle peridotite. *Contrib. Mineral. Petrol.*, vol. 131, pp. 323–346. <https://doi.org/10.1007/s004100050396>
- Niida K., Green D. H. 1999, Stability and chemical composition of pargasitic amphibole in MORB pyrolite under upper mantle conditions. *Contrib. Mineral. Petrol.*, vol. 135, pp. 18–40. <https://doi.org/10.1007/s004100050495>
- Arai S. 1994, Characterization of spinel peridotites by olivine-spinel compositional relationships: Review and interpretation. *Chemical Geology*, vol. 113, pp. 191–204. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)90066-3](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)90066-3)
- Downes H. 2001, Formation and Modification of the Shallow Sub-continental Lithospheric Mantle: a Review of Geochemical Evidence from Ultramafic Xenolith Suites and Tectonically Emplaced Ultramafic Massifs of Western and Central Europe. *J. Petrol.*, vol. 42, no. 1, pp. 233–250. <https://doi.org/10.1093/petrology/42.1.233>
- Niu Y. 2004, Bulk-rock Major and Trace Element Compositions of Abyssal Peridotites: Implications for Mantle Melting, Melt Extraction and Post-melting Processes Beneath Mid-Ocean Ridges. *J. Petrol.*, vol. 45, no. 12, pp. 2423–2458. <https://doi.org/10.1093/petrology/egh068>

\* ✉ chashchukhin@igg.uran.ru

 <http://orcid.org/0000-0001-8029-0260>

17. Palme H., Nickel K. G. 1985, Ca:Al ratio and composition of the Earth, supper mantle. *Geochim. Cosmochim. Acta*, vol. 49, no. 10, pp. 2123–2132. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(85\)90070-5](https://doi.org/10.1016/0016-7037(85)90070-5)
18. Frey F. A., Suen C. J., Stockman H. W. 1985, The Ronda high temperature peridotite: Geochemistry and petrogenesis. *Geochim. Cosmochim. Acta*, no. 49, pp. 2469–2491. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(85\)90247-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(85)90247-9)
19. Falloon T. J., Green D. Y. 1987, Anhydrous partial melting of MORB pyroxene and other peridotite compositions at 10 kb: implications for the origin of primitive MORB glasses. *Mineral Petrol.*, vol. 37, pp. 181–219.
20. Hofmann A. W. 1988, Chemical differentiation of the Earth: the relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust. *Earth Planet. Sci. Lett.*, vol. 90, pp. 297–314. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(88\)90132-X](https://doi.org/10.1016/0012-821X(88)90132-X)
21. Ringwood A. E. 1991, Phase transformation and their bearing on the constitution and dynamics of the mantle. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, no. 55, pp. 2083–2110. [http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037\(91\)90090-R](http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037(91)90090-R)
22. Allegre C. J., Poirier J. P., Humler E., Hoffman F. W. 1995, The chemical composition of the Earth. *Earth Planet. Sci. Lett.*, vol. 134, pp. 515–526.
23. McDonough W. F., Sun S.-S. 1995, The composition of the Earth. *Chem. Geol.*, vol. 120, pp. 223–253. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4)
24. Savelyev A. A., Savel'eva G. N. 1977, *Voykaro-Syn'inskiy massiv / Petrologiya i metamorfizm drevnikh ofiolitov (na primere Polyarnogo Urala i Zapadnogo Sayana)* [Voikar-Syninsky massif. Petrology and metamorphism of ancient ophiolites (using the Polar Urals and the Western Sayan as an example)]. Novosibirsk, pp. 60–91.
25. Bonatti E., Ottonello G., Hamlyn P. R. 1986, Peridotites from the island of Zabargad (St. John), Red Sea: Petrology and geochemistry. *J. Geophys. Res.*, vol. 91, pp. 599–631. <https://doi.org/10.1029/JB091iB01p00599>
26. Barth M. G., Mason P. R. D., Davies G. R., Drury M. R. 2008, The Othris Ophiolite, Greece: A snapshot of subduction initiation at a mid-ocean ridge. *Lithos.*, vol. 100, pp. 234–254. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.06.018>
27. Loney R. A., Himmelberg G. R., Coleman R. G. 1971, Structure and petrology of the alpine-type peridotite at Burro Mountain, California, U. S. A. *J. Petrol.*, vol. 12, part 2, pp. 245–309. <https://doi.org/10.1093/petrology/12.2.245>

The article was received on December 10, 2018