

Ф. П. Леснов¹, А. И. Чернышов², Е. Е. Пугачева³

¹ – *Институт геологии и минералогии СО РАН, г. Новосибирск
lesnovfp@list.ru*

² – *Томский государственный университет, г. Томск,*

³ – *Томский политехнический университет, г. Томск*

Геохимия редких и редкоземельных элементов в породах Шаманского ультрамафитового массива (Восточное Забайкалье)

Крупнейший в Восточном Забайкалье Шаманский ультрамафитовый массив, входящий в состав восточного фланга Байкало-Муйского офиолитового пояса совместно с Парамским массивом и несколькими более мелкими телами, к настоящему времени слабо изучен современными геохимическими методами. Массив расположен на правобережье р. Витим. Его линзовидное в плане тело вытянуто в север-северо-западном направлении на 25 км при максимальной ширине около 6 км. Общая площадь выходов массива составляет около 110 км². Геология, петрография и некоторые другие особенности строения и состава этого массива в разное время изучались Г. А. Кибановым, Э. Л. Прудовским, М. И. Грудининым, Е. Е. Зеленским, К. К. Анашкиной, К. Ш. Шагжиевым, Е. Е. Пугачевой, А. И. Чернышовым, А. А. Цыганковым, Д. А. Орсоевым, И. Ю. Лоскутовым, В. М. Асосковым, Ф. П. Лесновым.

Шаманский массив в рельефе представлен удлиненной возвышенностью, которая является одним из отрогов Южно-Муйского хребта. В массиве преобладают серпентинизированные гарцбургиты при подчиненном количестве неравномерно серпентинизированных дунитов, залегающих с постепенными переходами среди гарцбургитов в виде перемежающихся полос и линзовидных обособлений.

При геохимических исследованиях, проведенных в Аналитическом центре ИГМ СО РАН (г. Новосибирск), использована коллекция из 20 образцов дунитов и гарцбургитов, отобранных на разных участках массива. Редкие и редкоземельные элементы в породах определялись масс-спектрометрическим методом с индуктивно связанной плазмой и лазерной абляцией с применением масс-спектрометра «Element» (Finnigan MAT, Германия) в комплексе с лазерной приставкой UV Laser Probe (лазер Nd:YAG $\lambda = 266$ нм, Finnigan MAT, Германия) (аналитик С. В. Палесский). Для анализов использованы сплавленные в стекло порошковые пробы пород. В качестве образца сравнения использовалось стекло NIST-612 (USGS).

Ультрамафиты массива характеризуются относительно повышенными содержаниями Zr и Hf (табл. 1, 2). В дунитах содержание Zr составляет 15.9–163 г/т, в гарцбургитах – 8.0–158 г/т. Содержание Hf в дунитах составляет 0.20–3.8 г/т, в гарцбургитах – 0.17–3.4 г/т. Мультиэлементные спектры распределения хондрит-нормированных средних содержаний элементов-примесей в дунитах и гарцбургитах массива осложнены интенсивными положительными аномалиями Zr и Hf, причем значения параметра Zr/Hf в дунитах и гарцбургитах изменяются в интервале 40–48.7. Между содержаниями Zr и Hf в дунитах и гарцбургитах массива наблюдается прямая зависимость.

Главным концентратором Zr и Hf, очевидно, является аксессуарный циркон, причем количество его зерен в ультрамафитах массива относительно высокое. Это подтверждается тем, что при минералогическом анализе тяжелой фракции сборной пробы образцов ультрамафитов, отобранных на разных участках массива весом около 6 кг, было выделено порядка 10 зерен циркона размером в несколько десятков микрон.

Таблица 1

**Содержание редкоземельных и редких элементов
в дунитах Шаманского массива, г/т**

| Эле- менты | Номера образцов | | | | | | | | | |
|-----------------------|-----------------|--------|-------|-------|--------|-------|--------|--------|--------|-------|
| | Ш-1/3 | Ш-1/4 | Ш-2/2 | Ш-4/1 | Ш-5/3 | Ш-6/1 | Ш-24/2 | Ш-27/1 | Ш-33/6 | п.о. |
| La | 0.055 | 0.012 | 0.26 | 0.030 | 0.048 | 0.23 | 0.029 | 0.055 | 0.12 | 0.01 |
| Ce | 0.13 | 0.035 | 0.59 | 0.065 | 0.10 | 0.51 | 0.077 | 0.14 | 0.27 | 0.02 |
| Pr | 0.014 | 0.004 | 0.059 | 0.007 | 0.018 | 0.037 | 0.008 | 0.013 | 0.030 | 0.002 |
| Nd | 0.056 | 0.024 | 0.30 | 0.031 | 0.050 | 0.15 | 0.043 | 0.077 | 0.014 | 0.003 |
| Sm | 0.012 | 0.008 | 0.088 | 0.010 | 0.022 | 0.024 | 0.010 | 0.023 | 0.041 | 0.002 |
| Eu | 0.003 | 0.002 | 0.022 | 0.003 | 0.005 | 0.006 | 0.004 | 0.006 | 0.011 | 0.001 |
| Gd | 0.015 | 0.009 | 0.066 | 0.010 | 0.021 | 0.021 | 0.009 | 0.021 | 0.021 | 0.007 |
| Tb | <0.001 | <0.001 | 0.008 | 0.002 | <0.001 | 0.003 | 0.002 | 0.003 | 0.003 | 0.001 |
| Dy | 0.017 | 0.009 | 0.048 | 0.025 | 0.018 | 0.027 | 0.012 | 0.022 | 0.023 | 0.001 |
| Ho | 0.003 | <0.001 | 0.011 | 0.007 | 0.005 | 0.006 | 0.003 | 0.009 | 0.005 | 0.001 |
| Er | 0.013 | 0.007 | 0.038 | 0.023 | 0.015 | 0.030 | 0.010 | 0.048 | 0.020 | 0.006 |
| Tm | 0.002 | 0.001 | 0.006 | 0.004 | 0.003 | 0.005 | 0.002 | 0.009 | 0.003 | 0.001 |
| Yb | 0.013 | 0.005 | 0.040 | 0.020 | 0.014 | 0.030 | 0.010 | 0.079 | 0.017 | 0.001 |
| Lu | 0.002 | <0.001 | 0.007 | 0.004 | 0.002 | 0.005 | 0.002 | 0.012 | 0.002 | 0.001 |
| Сумма | 0.444 | 0.119 | 1.543 | 0.241 | 0.322 | 1.084 | 0.221 | 0.517 | 0.580 | |
| (La/Yb) _n | 2.80 | 1.60 | 4.44 | 1.01 | 2.24 | 5.23 | 1.95 | 0.47 | 4.78 | |
| (Eu/Eu*) _n | 0.71 | 0.80 | 0.84 | 0.93 | 0.77 | 0.81 | 1.18 | 0.84 | 1.06 | |
| Ca | 1857 | 1674 | 1961 | 2157 | 2012 | 5646 | 2430 | 4503 | 1730 | 300 |
| Sc | <0.1 | <0.1 | <0.1 | 1.91 | <0.1 | 1.30 | <0.1 | 3.7 | <0.1 | 0.1 |
| Ti | <2.0 | <2.0 | 128 | 37 | 14 | 20 | 4.6 | 46 | 62 | 2 |
| V | 8.4 | 4.0 | 9.8 | 24 | 9.5 | 35 | 8.8 | 34 | 10.0 | 0.5 |
| Cr | 1106 | 737 | 1204 | 1932 | 2087 | 2461 | 740 | 1901 | 1812 | 0.4 |
| Mn | 394 | 222 | 479 | 569 | 535 | 766 | 232 | 585 | 485 | 1 |
| Co | 44 | 29 | 59 | 68 | 59 | 81 | 30 | 71 | 57 | 0.05 |
| Ni | 885 | 600 | 1204 | 1305 | 1147 | 1573 | 610 | 1388 | 1106 | 1 |
| Cu | 4.0 | 2.8 | 7.5 | 6.4 | 8.4 | 14.8 | 1.0 | 4.2 | 6.0 | 1 |
| Zn | 21 | 39 | 26 | 30 | 55 | 54 | 30 | 64 | 67 | 2 |
| Ga | 0.31 | 0.24 | 0.49 | 0.68 | 0.35 | 0.93 | 0.39 | 1.03 | 0.34 | 0.20 |
| Rb | 0.32 | 0.23 | 0.61 | 0.57 | 0.51 | 0.66 | 0.22 | 0.58 | 0.40 | 0.1 |
| Sr | 1.49 | 0.72 | 1.60 | 1.18 | 1.26 | 2.1 | 1.48 | 6.8 | 1.91 | 0.5 |
| Y | 0.14 | 0.078 | 0.38 | 0.24 | 0.10 | 0.17 | 0.11 | 0.30 | 0.23 | 0.01 |
| Zr | 45 | 19.1 | 60 | 28 | 51 | 163 | 15.9 | 9.0 | 160 | 0.1 |
| Nb | 0.012 | 0.012 | 0.28 | 0.033 | 0.039 | 0.031 | 0.01 | 0.026 | 0.11 | 0.01 |
| Cs | 1.96 | 1.21 | 2.50 | 3.3 | 2.7 | 3.5 | 1.37 | 3.5 | 2.2 | 0.1 |
| Ba | 3.3 | 0.98 | 2.7 | 1.86 | 3.5 | 12.4 | 1.94 | 1.88 | 2.5 | 0.5 |
| Hf | 1.05 | 0.41 | 1.38 | 0.60 | 1.22 | 3.7 | 0.34 | 0.20 | 3.8 | 0.002 |
| Ta | 0.003 | 0.004 | 0.024 | 0.007 | 0.004 | 0.004 | 0.003 | 0.004 | 0.013 | 0.001 |
| Pb | 0.51 | 0.36 | 0.82 | 1.24 | 0.66 | 1.01 | 0.39 | 0.96 | 0.80 | 0.1 |
| Th | 0.018 | 0.012 | 0.060 | 0.01 | 0.021 | 0.067 | 0.01 | 0.17 | 0.040 | 0.01 |
| U | 0.014 | 0.005 | 0.018 | 0.005 | 0.005 | 0.01 | 0.011 | 0.007 | 0.014 | 0.002 |

Примечание. Здесь и табл. 2 п.о. – предел обнаружения.

Таблица 2

**Содержание редкоземельных и редких элементов
в гарцбургитах Шаманского массива, г/т**

| Элементы | Номера образцов | | | | | | | | | | | п.о. |
|----------|-----------------|-------|--------|--------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| | Ш-1/5 | Ш-4/3 | Ш-5/4 | Ш-10/4 | Ш-17/6А | Ш-17/6Б | Ш-23/1 | Ш-29/4 | Ш-41/7 | Ш-42/2 | Ш-43/6 | |
| La | 0.24 | 0.045 | 0.16 | 0.064 | 0.30 | 0.048 | 0.038 | 0.19 | 0.61 | 0.13 | 0.14 | 0.01 |
| Ce | 0.34 | 0.091 | 0.27 | 0.13 | 0.33 | 0.11 | 0.83 | 0.22 | 0.98 | 0.24 | 0.25 | 0.02 |
| Pr | 0.026 | 0.009 | 0.029 | 0.019 | 0.023 | 0.012 | 0.008 | 0.023 | 0.13 | 0.023 | 0.015 | 0.002 |
| Nd | 0.11 | 0.050 | 0.13 | 0.064 | 0.10 | 0.046 | 0.045 | 0.12 | 0.49 | 0.11 | 0.070 | 0.003 |
| Sm | 0.033 | 0.013 | 0.039 | 0.026 | 0.032 | 0.016 | 0.014 | 0.035 | 0.11 | 0.029 | 0.015 | 0.002 |
| Eu | 0.009 | 0.005 | 0.010 | 0.009 | 0.009 | 0.005 | 0.006 | 0.011 | 0.034 | 0.007 | 0.007 | 0.001 |
| Gd | 0.035 | 0.022 | 0.020 | 0.018 | 0.029 | 0.010 | 0.013 | 0.029 | 0.12 | 0.024 | 0.019 | 0.007 |
| Tb | 0.006 | 0.003 | <0.001 | <0.001 | 0.004 | 0.002 | <0.001 | <0.001 | 0.018 | <0.001 | 0.002 | 0.001 |
| Dy | 0.049 | 0.030 | 0.022 | 0.018 | 0.023 | 0.009 | 0.015 | 0.031 | 0.13 | 0.018 | 0.016 | 0.001 |
| Ho | 0.014 | 0.007 | 0.006 | 0.004 | 0.006 | 0.002 | 0.003 | 0.009 | 0.040 | 0.004 | 0.004 | 0.001 |
| Er | 0.058 | 0.025 | 0.042 | 0.019 | 0.026 | 0.010 | 0.015 | 0.042 | 0.14 | 0.021 | 0.021 | 0.006 |
| Tm | 0.011 | 0.004 | 0.010 | 0.003 | 0.004 | 0.002 | 0.002 | 0.006 | 0.026 | 0.005 | 0.004 | 0.001 |
| Yb | 0.087 | 0.024 | 0.071 | 0.016 | 0.027 | 0.012 | 0.016 | 0.046 | 0.16 | 0.028 | 0.029 | 0.001 |
| Lu | 0.014 | 0.003 | 0.011 | 0.002 | 0.004 | 0.002 | 0.003 | 0.005 | 0.021 | 0.006 | 0.004 | 0.001 |
| Сумма | 1.032 | 0.331 | 0.821 | 0.393 | 0.917 | 0.286 | 1.009 | 0.768 | 3.009 | 0.646 | 0.596 | |
| (La/Yb) | 2.46 | 1.24 | 1.50 | 2.69 | 7.50 | 2.64 | 1.55 | 2.83 | 2.57 | 3.03 | 3.18 | |
| (Eu/Eu*) | 0.85 | 0.96 | 0.96 | 1.20 | 0.90 | 1.16 | 1.28 | 1.00 | 0.88 | 0.79 | 1.24 | |
| Ca | 13722 | 2716 | 8290 | 3859 | 3431 | 2501 | 3216 | 5074 | 6718 | 3716 | 4717 | 300 |
| Sc | 9.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | 0.71 | 1.17 | <0.1 | <0.1 | 1.71 | 4.2 | 1.10 | 0.1 |
| Ti | 45 | 26 | 24 | 10 | 18.4 | 11.3 | 17.2 | 21 | 221 | 11.5 | 10.8 | 2.0 |
| V | 47 | 24 | 33 | 18.8 | 28 | 21 | 16.4 | 33 | 43 | 32 | 26 | 0.5 |
| Cr | 2677 | 2063 | 2223 | 1039 | 2956 | 1910 | 1251 | 3491 | 2981 | 2157 | 2039 | 0.4 |
| Mn | 954 | 229 | 664 | 661 | 668 | 626 | 453 | 682 | 832 | 824 | 798 | 1.0 |
| Co | 90 | 42 | 80 | 66 | 68 | 62 | 52 | 74 | 90 | 80 | 84 | 0.05 |
| Ni | 1634 | 921 | 1609 | 1230 | 1196 | 1085 | 1031 | 1400 | 1686 | 1448 | 1591 | 1.0 |
| Cu | 15.2 | 51 | 6.2 | 2.4 | 8.9 | 11.4 | 7.7 | 12.6 | 18.8 | 4.6 | 4.4 | 1.0 |
| Zn | 43 | 26 | 38 | 28 | 44 | 28 | 92 | 57 | 75 | 40 | 35 | 2.0 |
| Ga | 0.99 | 0.65 | 0.98 | 0.54 | 0.50 | 0.45 | 0.54 | 0.84 | 1.25 | 0.68 | 0.65 | 0.20 |
| Rb | 0.87 | 0.45 | 0.89 | 0.58 | 0.63 | 0.63 | 0.48 | 0.58 | 1.38 | 0.65 | 0.63 | 0.1 |
| Sr | 2.0 | 0.86 | 1.81 | 2.1 | 1.38 | 0.86 | 1.88 | 2.7 | 3.9 | 3.3 | 2.2 | 0.5 |
| Y | 0.57 | 0.21 | 0.28 | 0.26 | 0.20 | 0.089 | 0.15 | 0.19 | 1.29 | 0.16 | 0.29 | 0.01 |
| Zr | 62 | 8.0 | 10.0 | 38 | 37 | 13.8 | 19.6 | 25 | 158 | 40 | 54 | 0.1 |
| Nb | 0.037 | 0.030 | 0.027 | 0.027 | 0.025 | 0.027 | 0.033 | 0.035 | 0.32 | 0.023 | 0.035 | 0.01 |
| Cs | 4.0 | 2.3 | 4.1 | 2.8 | 2.8 | 2.8 | 2.5 | 3.5 | 4.3 | 3.4 | 3.4 | 0.1 |
| Ba | 4.1 | 1.97 | 3.7 | 2.5 | 4.8 | 2.1 | 2.1 | 4.7 | 11.2 | 6.7 | 3.6 | 0.5 |
| Hf | 1.35 | 0.17 | 0.22 | 0.82 | 0.76 | 0.30 | 0.49 | 0.56 | 3.4 | 0.90 | 1.22 | 0.002 |
| Ta | 0.004 | 0.001 | 0.002 | 0.002 | <0.001 | 0.002 | 0.002 | 0.005 | 0.029 | 0.004 | 0.007 | 0.001 |
| Pb | 1.21 | 0.49 | 1.02 | 0.86 | 0.70 | 0.65 | 0.90 | 1.28 | 1.61 | 1.18 | 1.36 | 0.1 |
| Th | 0.064 | 0.013 | 0.010 | 0.012 | 0.046 | 0.011 | 0.015 | 0.012 | 0.27 | 0.028 | 0.022 | 0.01 |
| U | 0.014 | 0.055 | 0.009 | 0.002 | 0.006 | 0.009 | 0.002 | 0.008 | 0.061 | 0.006 | 0.037 | 0.002 |

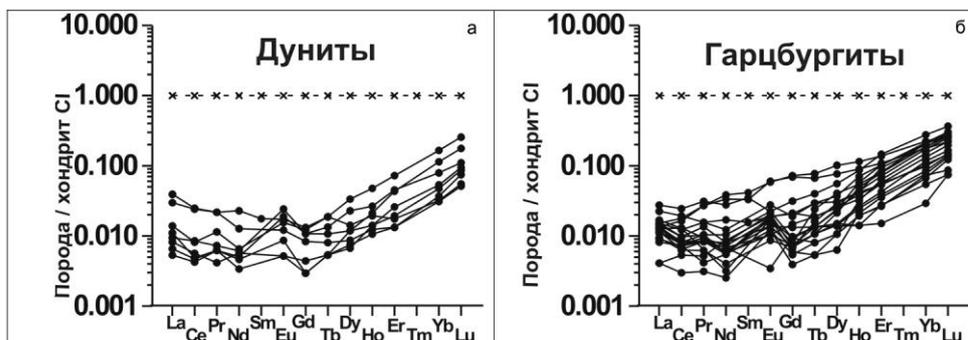


Рис. Спектры распределения РЗЭ в дунитах (а) и гарцбургитах (б) Шаманского массива.

Породы массива характеризуются низкими содержаниями РЗЭ, имеющими неравномерное распределение: 0.12–1.54 и 0.29–3.01 г/т в дунитах и гарцбургитах, соответственно. Согласно расчетам, средние суммарные содержания РЗЭ составляют 0.89 и 1.8 г/т в реститогенных дунитах ($n = 45$) и гарцбургитах ($n = 114$), соответственно [Леснов, 2007]. Спектры распределения хондрит-нормированных содержаний РЗЭ в дунитах и гарцбургитах Шаманского массива имеют U-образную конфигурацию, обусловленную повышенными концентрациями ЛРЗЭ относительно средних элементов, и заметным увеличением концентраций в интервале от средних к тяжелым элементам (рис.).

Значения параметра $(La/Yb)_n$ в образцах ультрамафитов превышают единицу: 1.01–5.23 и 1.50–7.50 в дунитах и гарцбургитах, соответственно. Значения параметра $(Eu/Eu^*)_n$ составляют 0.77–1.28 при преобладании значений <1 . Обогащенность легкими РЗЭ относительно средних элементов и обусловленная этим дугообразно изогнутая вниз конфигурация их спектров наблюдались также во многих образцах ультрамафитов из ряда других мафит-ультрамафитовых массивов, входящих в состав некоторых офиолитовых ассоциаций. Подобное обогащение ультрамафитов легкими РЗЭ противоречит представлениям об их образовании в качестве реститов, т.е. тугоплавкого остатка при частичном плавлении верхнемантийных субстратов. По нашим данным, аномальное обогащение ультрамафитов и их минералов из мафит-ультрамафитовых массивов, а также из глубинных ксенолитов легкими РЗЭ обусловлено привнесением этих примесей в породы в процессе инфильтрации обогащенных ими эпигенетических флюидов, генетически связанных с более поздними интрузивами основного или кислого состава, а в случае с глубинными ксенолитами ультрамафитов – с переносившими их базальтовыми расплавами [Леснов, 2007].

Таким образом, концентрации ЛРЗЭ в ультрамафитах, которые фиксируются по результатам анализов их валовых проб, не вполне адекватно отражают уровень накопления этих элементов-примесей, который соответствовал их изначальным содержаниям в ультрамафитах, образовавшихся в качестве рестита. Очевидно, что первичному (верхнемантийному) уровню накопления РЗЭ в реститах в наибольшей мере могут соответствовать содержания более совместимых ТРЗЭ, в первую очередь, Yb, содержания которого в дунитах и гарцбургитах Шаманского массива составили 0.005–0.079 и 0.012–0.16 г/т, соответственно. Более корректные данные о первичном РЗЭ составе верхнемантийных ультрамафитовых реститов могут быть получены,

если предназначенные для анализа методом ICP-MS навески проб предварительно будут подвергнуты выщелачиванию в разбавленном растворе соляной кислоты.

Литература

Леснов Ф. П. Петрология полигенных мафит-ультрамафитовых массивов Восточно-Сахалинской офиолитовой ассоциации. Новосибирск: ГЕО, 2015. 240 с.

М. А. П. Пинхейро^{1,2}, Ф. П. Леснов²

¹ – *Бразильская геологическая служба, г. Белу Оризонте, Бразилия
marcopiacentini@gmail.com*

² – *Институт геологии и минералогии СО РАН, г. Новосибирск*

Геохимия оливинов из пород ультрамафитового массива Розета (кратон Сан Франциско, юго-восточная Бразилия)

Ультрамафитовый массив Розета находится вблизи гг. Арантина и Либердаде (штат Минас Жераис, юго-восточная Бразилия) и структурно приурочен к кратону Сан Франциско [Paciullo et al., 2003]. Он залегает среди протерозойских метаморфических пород и обнажается на площади около 4 км², значительная часть которой покрыта корой выветривания. Массив сложен лерцолитами, клинопироксенсодержащими и безклинопироксеновыми шпинелевыми гарцбургитами, серпентинитами, реже – оливиновыми вебстеритами, а также жилообразными оливин-ортопироксеновыми метасоматитами с зеленой шпинелью, условно названными «гарцбургитами». Около 60 анализов зерен оливина из шести образцов массива было проанализировано рентгеноспектральным методом на микроанализаторе JEOL JXA-8100 (Аналитический центр ИГМ СО РАН, г. Новосибирск, аналитик В. Н. Королук). Время измерения на пике каждой аналитической К α -линии составило 10 с, а также по 5 с в позиции фона с двух сторон от этой линии. Использовались стандартные образцы оливина (СН-1), пиропового граната (О-145), титанового стекла (GL-6) и марганцевого граната (Mn-Grt).

Содержания главных и второстепенных элементов в оливинах сильно варьируют. Средние содержания MgO в них уменьшаются в ряду от шпинелевых гарцбургитов к клинопироксенсодержащим шпинелевым гарцбургитам, лерцолитам, оливиновым вебстеритам и «гарцбургитам», содержащим зеленую шпинель (табл.). В той же последовательности увеличиваются средние содержания FeO. Содержания форстеритового компонента (Fo, % мол.) в оливинах уменьшаются в ряду от шпинелевых гарцбургитов к клинопироксенсодержащим шпинелевым гарцбургитам, лерцолитам, оливиновым вебстеритам и «гарцбургитам» с зеленой шпинелью. Интервалы вариаций значений параметра Fo в оливинах из отдельных разновидностей пород не перекрываются (рис. 1а).

Оливины из разных пород отличаются по содержаниям NiO и MnO (рис. 1а, б). Оливины из лерцолитов характеризуются аномально высокими содержаниями NiO (0.71–0.87 мас. %) по сравнению с таковыми из остальных пород. В крайне незначительных количествах (0.01–0.02 мас. %) NiO обнаружен в оливинах из «гарцбургитов»