

## ГЕОХИМИЯ РЕДКИХ, РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ И ПЛАТИНОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПОРОДАХ ШАМАНСКОГО УЛЬТРАМАФИТОВОГО МАССИВА (ВОСТОЧНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ)

© 2016 г. Ф. П. Леснов\*, А. И. Чернышов\*\*, Е. Е. Пугачева\*\*\*

\*Институт геологии и минералогии СО РАН  
630090, г. Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3  
E-mail: lesnovfp@list.ru

\*\*Томский государственный университет  
634050, г. Томск, просп. Ленина, 36  
E-mail: aich@ggf.tsu.ru

\*\*\*Томский политехнический университет  
634050, Томск, просп. Ленина, 30  
E-mail: pugachevae@tpu.ru

Поступила в редакцию 23.06.2015 г.

Принята к печати 13.05.2016 г.

Представлены результаты комплексных геохимических исследований пород Шаманского массива – крупнейшего протрузивного тела верхнемантийных ультрамафитовых реститов, входящего в состав восточной ветви Байкало-Муйского офиолитового пояса. Массив сложен в разной мере серпентинизированными гарцбургитами и подчиненными им дунитами. С применением микроструктурного метода изучения оливинов выявлена динамометаморфическая зональность массива. Состав пород и их минералов исследован с применением рентгенофлуоресцентного и масс-спектрометрического методов, метода синхронного излучения и ряда других. Гарцбургиты и дуниты обеднены CaO, TiO<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>O и K<sub>2</sub>O, а также редкоземельными элементами (РЗЭ). Суммарные содержания последних в гарцбургитах колеблются в интервале 0.29–3.01 г/т, в дунитах – от 0.12 до 1.54 г/т. Спектры распределения хондрит-нормированных содержаний РЗЭ имеют дугообразно изогнутую книзу конфигурацию, обусловленную аномальным обогащением пород неструктурной примесью легких элементов, сосредоточенной в межзерновых и внутризерновых микротрещинах. Породы массива характеризуются повышенными содержаниями Zr и Hf, в качестве главного концентратора которых рассматривается циркон. Его единичные зерна обнаружены в искусственных шлихах пород. Суммарные содержания элементов платиновой группы (ЭПГ) в гарцбургитах и дунитах составляют от 1.50 до 24.35 мг/т, при этом преобладающим элементом в них является Ru. Выявлена обратная зависимость между его содержаниями и содержаниями тяжелых РЗЭ (Er, Tm, Yb, Lu), а также между суммарными содержаниями ЭПГ и РЗЭ. Такая зависимость, как предполагается, обусловлена разнонаправленным фракционированием этих контрастных по своим химическим свойствам групп элементов в процессе частичного плавления верхнемантийного протолита. Преобладание Ru над другими ЭПГ позволило предположить, что эти элементы в породах массива преимущественно находятся в составе рутеносмирида и лаурита.

Ключевые слова: *реститы, гарцбургиты, дуниты, геохимия, редкие и редкоземельные элементы, элементы платиновой группы, Шаманский массив, Байкало-Муйский офиолитовый пояс, Восточное Забайкалье.*

Исследования закономерностей распределения элементов-примесей в породах и минералах, а также в хромитовых рудах из ультрамафитовых массивов с применением современных аналитических методов являются одной из актуальных задач, решение которой должно способствовать усовершенствованию моделей формирования и определению потенциальной рудоносности таких массивов. К числу еще мало изученных в этом отношении относится крупнейший в Восточном Забайкалье Шаманский ультрамафитовый массив, который совместно с Парамским массивом и несколькими

более мелкими телами входит в состав восточного фланга Байкало-Муйского офиолитового пояса. Структурная позиция этих массивов контролируется зоной глубинных разломов, разграничивающих Сибирскую платформу и ее южное складчатое обрамление.

Линзовидное в плане тело Шаманского массива, расположенного на правом берегу р. Витим, вытянуто в север-северо-западном направлении на расстояние около 25 км при максимальной ширине около 6 км. Общая площадь выходов массива составляет около 110 км<sup>2</sup>. По размеру этот массив на-

ходится в одном ряду с такими крупными ультрамафитовыми массивами, как Иджимский в Западном Саяне (106 км<sup>2</sup>), Оспинско-Китойский в Восточном Саяне (более 200 км<sup>2</sup>), Наранский (188 км<sup>2</sup>) и Шишихидгольский (285 км<sup>2</sup>) в Монголии.

Материалы о геологическом строении Шаманского массива, основанные на результатах геологосъемочных работ, были опубликованы в работах [1, 6, 7, 8, 22]. В них обобщены результаты среднемасштабного геологического картирования как этого массива, так и района в целом. Позже отдельные аспекты геологии, петрографии, петрохимии, минералогии, геохимии и динамометаморфизма пород массива, а также его потенциальной хромитовосности и платиновосности обсуждались в работах [5, 16, 19–21, 23, 24, 27–29]. Что касается геохимических исследований пород этого массива с применением современных аналитических методов, то они проводились в очень ограниченных объемах. Этот пробел призваны в определенной мере восполнить представленные ниже результаты комплексных геохимических исследований Шаманского массива.

#### КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МАССИВА

Шаманский массив в рельефе выражен в виде удлиненной возвышенности, которая является одним из отрогов Южно-Муйского хребта. Вершина горы Шаман, находящейся в северной части массива, возвышается над уровнем р. Витим более чем на 1800 м. Он является одним из фрагментов комплекса альпинотипных (“метаморфических”) перидотитов, входящих в состав Байкало-Муйского офиолитового пояса. Массив имеет субвертикальные тектонические контакты с вмещающими метаморфическими образованиями протерозойского возраста. Вдоль западного экзоконтакта массива вмещающие толщи сложены преимущественно амфиболитами и карбонатными отложениями, а вдоль его восточного экзоконтакта – метапесчаниками и кварцитами. По геофизическим данным массив прослеживается на глубину до 4.5 км.

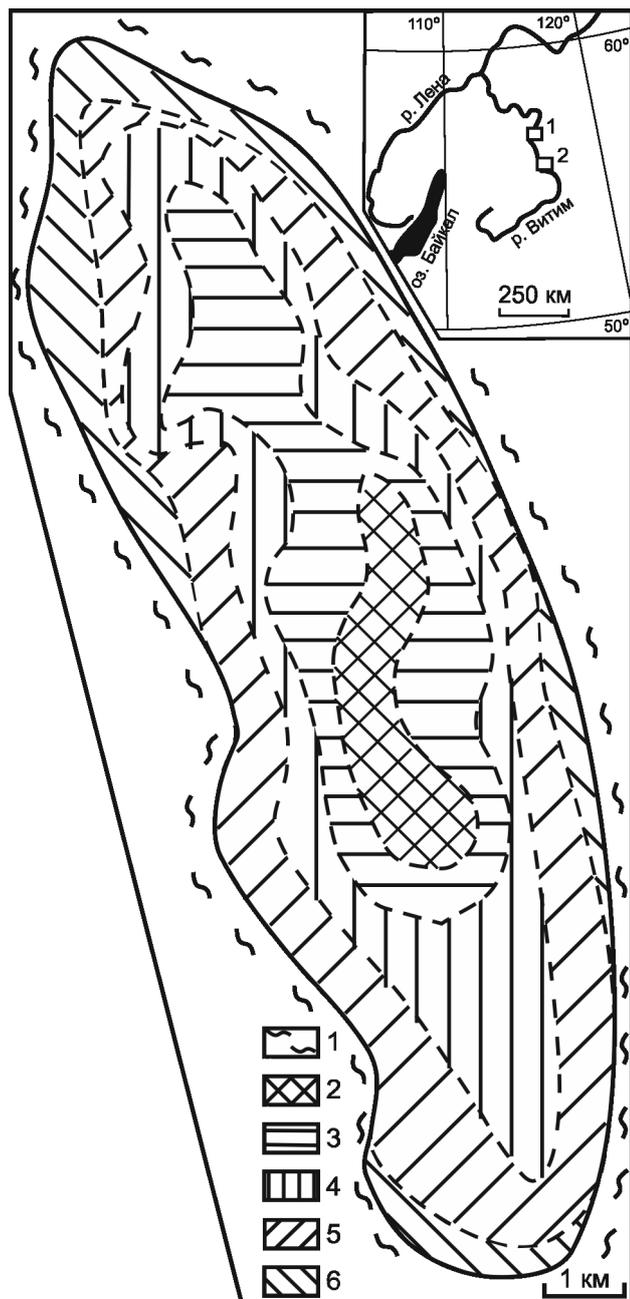
В массиве преобладают в разной мере серпентинизированные гарцбургиты, в подчиненном количестве находятся неравномерно серпентинизированные дуниты, залегающие среди гарцбургитов в виде перемежающихся полос и линзовидных обособлений, имеющих постепенные переходы к гарцбургитам [27]. Мощности полос гарцбургитов и дунитов местами достигают 200–300 м при протяженности до первых километров [22]. Вдоль западного эндоконтакта массива расположена мощная зона интенсивно рассланцованных серпентинитов, среди которых выявлены отдельные участки тальк-карбонат-серпентинитовых пород. По мере удаления от контактов массива в направлении к его осевой

зоне интенсивность серпентинизации и динамометаморфизма ультрамафитов уменьшается. Рассланцованные серпентиниты слагают также узкие зоны вдоль разрывных нарушений, пересекающих массив в разных направлениях.

#### Микроструктурные исследования оливинов

В оливинах из дунитов и гарцбургитов Шаманского массива обычно наблюдаются признаки их пластического деформирования – неравномерное погасание, полосы пластического излома и порфинокластез, которые свойственны этому минералу из ультрамафитов, входящих в состав офиолитовых ассоциаций [4, 5, 23, 24, 28]. По совокупности этих признаков и интенсивности их проявления в оливинах из гарцбургитов и дунитов Шаманского массива Е.Е. Пугачевой [24] были выделены следующие микроструктурные типы этого минерала: протогранулярный, мезогранулярный, порфинокластовый, порфиroleйстовый и мозаичный. Их последовательность отражает возрастание степени пластического деформирования пород. Анализ распределения микроструктур оливина в пределах массива выявил в нем динамометаморфическую зональность (рис. 1). Наименее деформированные разновидности гарцбургитов и дунитов с протогранулярной и мезогранулярной микроструктурами оливинов слагают центральные зоны массива. В свою очередь наиболее деформированные гарцбургиты и дуниты, оливины из которых имеют порфинокластовую, порфиroleйстовую и мозаичную микроструктуру, слагают периферические части массива. Предполагается, что ультрамафиты с протогранулярной и мезогранулярной микроструктурами оливинов были деформированы в условиях верхней мантии в процессе высокотемпературных и низкоскоростных пластических деформаций. В отличие от предыдущих ультрамафиты с порфинокластовой, порфиroleйстовой и мозаичной микроструктурами оливинов претерпели интенсивное пластическое течение в процессе их перемещения в верхние этажи литосферы в условиях понижения температур и повышенной скорости деформации.

При рассмотрении полученных нами результатов геохимических исследований ультрамафитов Шаманского массива в качестве объекта сравнения был выбран весьма детально изученный в геохимическом отношении ультрамафитовый комплекс Изу-Бонин, расположенный под акваторией западной части Тихого океана к югу от островов Японии [32]. Этот комплекс изучался по образцам ультрамафитов, полученным из керна скважин, которые были пробурены в пределах нескольких подводных возвышенностей (симаунтов). Опубликованные геохимические данные по образцам ультрамафитов из этого комплекса использованы при обсуждении результатов исследований ультрамафитов Шаман-



**Рис. 1.** Схема динамометаморфической зональности Шаманского массива [23, 24].

1 – метаморфические породы; 2–6 – деформационные типы микроструктур оливина в дунитах и гарцбургитах: 2 – протогранулярный, 3 – мезогранулярный, 4 – порфирокластовый, 5 – порфиroleйстовый, 6 – мозаичный. На врезке показано положение Парамского (1) и Шаманского (2) ультрамафитовых массивов.

**Fig. 1.** The dynamometamorphic zoning scheme of Shaman massif [23, 24].

1 – metamorphic rocks; 2–6 – deformativ types of olivines from dunites and harzburgites: 2 – protogranularity, 3 – mesogranularity, 4 – porphiroclastic, 5 – porphiroleystic, 6 – mosaic. The incut shows the position of Param (1) and Shaman (2) ultramafic massifs.

ского массива. При выборе комплекса Изу-Бонин в качестве объекта сравнения принималось во внимание, во-первых, то, что этот комплекс, как и Шаманский массив, представляет собой очень крупный выход верхнемантийных реститовых ультрамафитов, и во-вторых, то что он, в отличие от множества подобных ему комплексов, особенно детально был изучен в геохимическом отношении.

Основную рабочую коллекцию, предназначенную для геохимических исследований Шаманского массива, составили в различной мере деформированные 9 образцов дунитов и 11 образцов гарцбургитов, отобранные в разных частях массива. Кроме новых данных, полученных при изучении основной коллекции образцов, в работе используются некоторые материалы геохимических исследований ультрамафитов из этого массива, полученные ранее.

#### МЕТОДЫ АНАЛИТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Аналитические исследования образцов пород из рабочей коллекции были выполнены в Аналитическом центре Института геологии и минералогии СО РАН. Они включают следующие виды анализов: 1) анализ общего химического состава пород, выполненный рентгенфлуоресцентным методом (РФА) на спектрометре ARL 9900XP (фирма Termo Electron corporation, США-Швейцария). 2) анализ редких и редкоземельных элементов в породах, выполненный двумя методами: а) методом синхротронного излучения (РФА-СИ) с применением многоколлекторной детекторной установки; б) масс-спектрометрическим методом с индуктивно связанной плазмой и лазерной абляцией (LA ICP-MS) на масс-спектрометре "Element" (фирма Finnigan MAT, Германия) в комплексе с лазерной приставкой UV Laser Probe (лазер Nd:YAG 266 нм, фирма Finnigan MAT, Германия). При проведении этих анализов использованы те же сплавленные в стекло порошковые пробы, в которых предварительно определялся общий химический состав пород методом РФА; при анализе методом LA ICP-MS в качестве стандарта использовали стекло NIST-612 (фирма USG); достигнутые нижние пределы обнаружения элементов при этом виде анализа составили (г/т): La – 0.001, Ce – 0.002, Pr – 0.0002, Nd – 0.003, Sm – 0.002, Eu – 0.001, Gd – 0.007, Tb – 0.001, Dy – 0.001, Ho – 0.001, Er – 0.006, Tm – 0.001, Yb – 0.001, Lu – 0.001. 3) анализ элементов платиновой группы и рения, также выполненный масс-спектрометрическим методом с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) на масс-спектрометре "Element" (фирма Finnigan MAT, Германия). Кислотное разложение этих навесок проб выполнялось двумя способами: а) в автоклаве системы MARS-5; б) в трубке Кариуса (пробир-

ки из особо прочного стекла). Достигнутые при этом нижние пределы обнаружения элементов платиновой группы составили (нг/г): Os – 0.071, Ir – 0.002, Ru – 0.005, Pt – 0.066, Pd – 0.086, Re – 0.091. 4) анализ химического состава оливинов, выполненный рентгеноспектральным методом на микроанализаторе JXA-8100 “Camebax-Micro”. 5) анализ редкоземельных элементов в оливинах, выполненный нейтронно-активационным методом с радиохимической пробоподготовкой. 6) анализ летучих компонентов в оливинах, выполненный декрипитационным и газохроматографическим методами.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

### Петрохимическая характеристика пород

Ультрамафиты Шаманского массива характеризуются неравномерной серпентинизацией, о чем свидетельствуют значительные вариации потерь при прокаливании их проб – от 1.88 до 11.88 мас. % (табл. 1). Для более корректного сравнения состава образцов пород их химические анализы пересчитывались на “сухое вещество”, то есть приводились к 100 мас. %.

**Таблица 1.** Химический состав дунитов и гарцбургитов из Шаманского массива, мас. %

**Table 1.** Chemical composition of dunites and harzburgites from Shaman massif, wt %

Компоненты	Дуниты									
	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	
SiO <sub>2</sub>	39.52	40.55	40.10	40.04	39.46	42.28	40.65	38.81	40.66	
TiO <sub>2</sub>	<0.01	<0.01	0.02	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.32	0.22	0.34	0.89	0.31	0.94	0.62	1.26	0.26	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> общ	8.67	8.51	7.94	8.03	8.93	8.58	8.29	8.54	8.14	
MnO	0.12	0.12	0.11	0.10	0.13	0.12	0.12	0.10	0.12	
MgO	46.27	46.74	47.84	42.30	48.43	44.36	43.33	38.65	48.77	
CaO	0.18	0.10	0.09	0.10	0.09	0.79	0.34	0.63	0.11	
Na <sub>2</sub> O	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	
K <sub>2</sub> O	<0.005	<0.005	0.01	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	
BaO	0.01	0.01	0.01	0.01	<0.01	0.01	0.01	<0.01	0.01	
П.п.п.	4.79	3.63	3.46	8.33	2.50	2.81	6.51	11.88	1.88	
Сумма	99.89	99.87	99.94	99.80	99.87	99.89	99.87	99.87	99.95	
Тип микроструктуры оливинов	МЗ	МЗ	ПК	РГ	ЛС	ПК	ПГ	ПГ	ПК	

Компоненты	Гарцбургиты										
	Номера образцов										
	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
SiO <sub>2</sub>	41.39	40.02	39.97	39.85	40.12	40.26	39.69	40.64	44.78	41.97	40.79
TiO <sub>2</sub>	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.02	<0.01	<0.01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.45	1.39	1.06	0.69	0.73	0.75	0.65	0.95	1.23	0.87	0.57
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> общ	8.00	7.77	7.48	8.78	9.13	9.00	7.79	8.26	8.04	8.64	8.51
MnO	0.11	0.07	0.10	0.12	0.13	0.13	0.10	0.12	0.11	0.13	0.12
MgO	39.90	38.31	40.65	41.89	43.08	43.61	42.95	42.36	44.78	43.23	44.53
CaO	1.92	0.38	1.16	0.54	0.48	0.35	0.46	0.71	0.94	0.52	0.66
Na <sub>2</sub> O	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
K <sub>2</sub> O	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	0.03	<0.005	<0.005
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01
BaO	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00
П.п.п.	6.99	11.84	9.31	8.13	5.90	5.81	8.27	6.69	4.95	4.61	4.82
Сумма	99.80	99.79	99.75	100.02	99.60	99.93	99.95	99.76	99.87	99.99	100.02
Тип микроструктуры оливинов	ЛС	РГ	ПГ	ЛС	ПГ	ПГ	ПГ	ЛС	ЛС	ПК	ПГ

Примечание. Анализы выполнены рентгенофлуоресцентным методом в Аналитическом центре ИГМ СО РАН (исполнитель Н.Г. Карманова). Типы микроструктуры оливинов [24]: ПГ – протогранулярный, ПК – порфирокластовый, ЛС – лейстовый, МЗ – мозаичный, РГ – регенерированный.

Note. Analyses carried out by X-ray fluorescence method at the Analytical Center IGM SB RAS (analyst N.G. Karmanova). Types of microstructure of olivines [24]: ПГ – protogranularity, ПК – porfiroclastic, ЛС – leystic, МЗ – mosaic, РГ – regenerated.

Ранее было установлено, что ультрамафиты из Шаманского массива по своему химическому составу сопоставимы с реститовыми ультрамафитами из Оспинско-Китойского массива, который является наиболее крупным фрагментом ультрамафитового комплекса Восточно-Саянской офиолитовой ассоциации. В то же время в ультрамафитах из Шаманского массива были определены несколько большие содержания  $\text{CaO}$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  по сравнению с породами из Оспинско-Китойского, что рассматривалось как свидетельство более низкой степени частичного плавления верхнемантийного протолита при образовании ультрамафитов Шаманского массива [28]. Гарцбургиты и дуниты из Шаманского массива в целом характеризуются значительной истощенностью  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  и  $\text{TiO}_2$ , что свойственно этим породам из большинства офиолитовых ассоциаций.

На графиках вариации содержаний  $\text{MgO}$  и  $\text{CaO}$  поля фигуративных точек дунитов и гарцбургитов из Шаманского массива почти полностью совпадают с полями точек этих пород из комплекса Изу-Бонин. В свою очередь, графики вариации содержаний  $\text{MgO}$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в дунитах из Шаманского массива свидетельствуют о некоторой их обогащенности  $\text{Al}_2\text{O}_3$  по сравнению с этими породами из комплекса Изу-Бонин (рис. 2). Сравнение составов ультрамафитов из Шаманского массива и комплекса Изу-Бонин на диаграммах  $\text{Mg/Si}$  и  $\text{Al/Si}$  (см. рис. 2) показало, что их рестирование происходило в условиях близкой степени частичного плавления верхнемантийного субстрата [3]. В обоих случаях тренды расположения точек имеют отрицательный наклон, что указывает на снижение степени частичного плавления верхнемантийного субстрата от дунитов к гарцбургитам. Можно также видеть, что ультрамафитам из обоих комплексов свойственны намного более высокие значения параметра  $\text{Mg/Si}$  и более низкие значения параметра  $\text{Al/Si}$  по сравнению с пиролитом. В целом можно предположить, что при образовании ультрамафитов Шаманского массива степень частичного плавления верхнемантийного протолита была несколько меньшей по сравнению с ультрамафитами из комплекса Изу-Бонин.

Важно отметить, что при сравнении составов ультрамафитов с использованием нормированных по примитивной мантии отношений абсолютных содержаний главных химических компонентов (петрохимических параметров) нет необходимости в пересчете результатов исходных химических анализов на 100 мас. %. Графики вариации значений этих параметров для дунитов и гарцбургитов из Шаманского массива и из комплекса Изу-Бонин при общей схожести их конфигурации имеют некоторые различия (рис. 3). Так, на графиках гарцбургитов и особенно дунитов из Шаманского массива минимумы для параметра  $\text{CaO/SiO}_2$

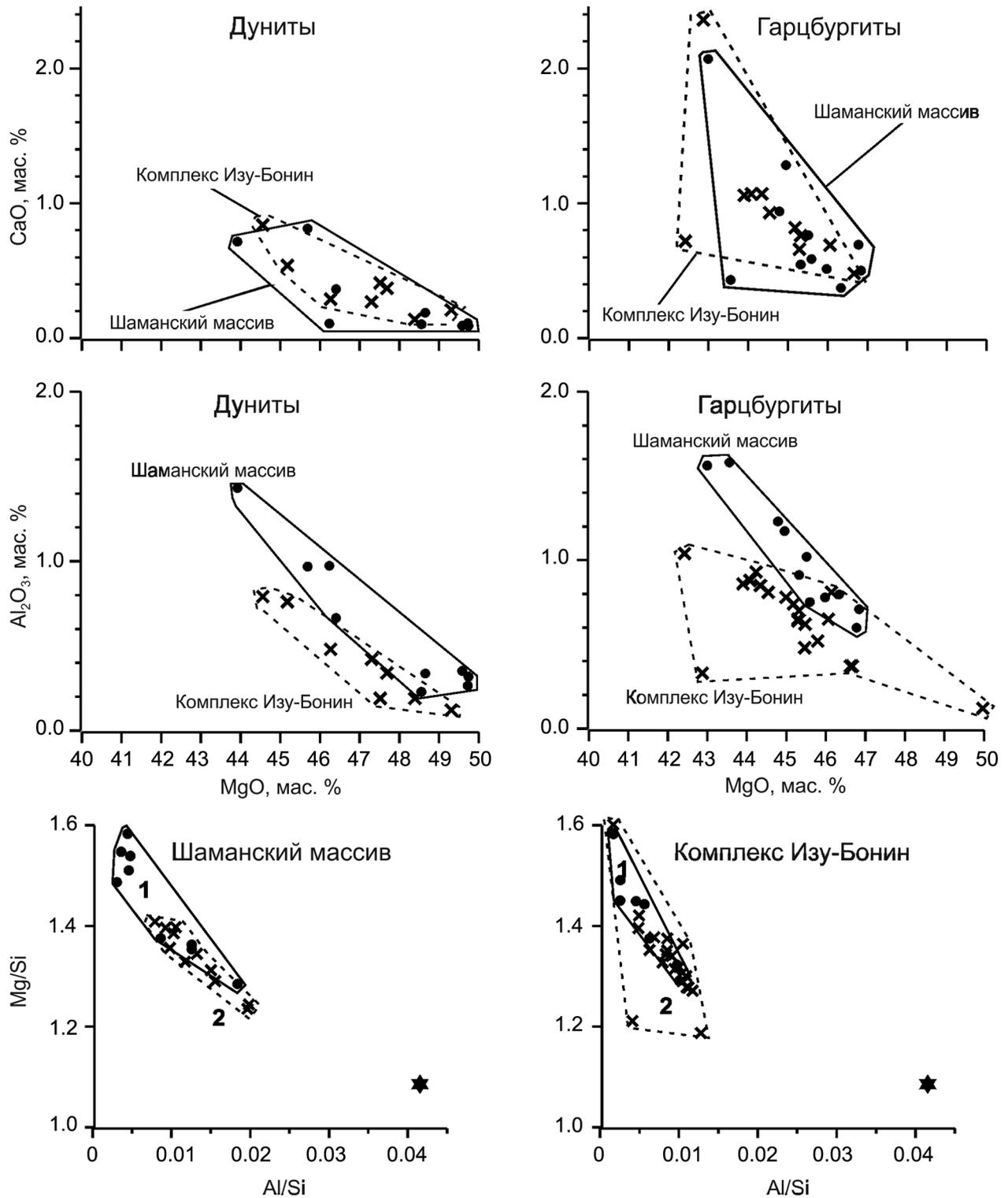
имеют несколько большую интенсивность, а максимумы для параметров  $\text{MgO/Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{MgO/CaO}$  – меньшую интенсивность по сравнению с теми же максимумами для ультрамафитов комплекса Изу-Бонин. При этом значения параметров  $\text{MgO/SiO}_2$ ,  $\text{MgO/FeO}_{\text{общ}}$  и  $\text{CaO/Al}_2\text{O}_3$  для дунитов и гарцбургитов из Шаманского массива и из комплекса Изу-Бонин очень близки к их значениям для примитивной мантии.

### Геохимическая характеристика пород

Сведения о распределении элементов-примесей, как и об отношениях содержаний индикаторных элементов, в разнотипных магматических породах значительно расширяют возможности при выполнении процедур дискриминации и систематики, как самих пород, так и слагаемых ими массивов. Вместе с тем, достаточные для таких процедур объемы полученной с применением современных аналитических методов геохимической информации по породам и минералам из ультрамафитовых массивов офиолитовых комплексов, расположенных в складчатых областях на территории России, пока имеются в ограниченных количествах. Это не позволяет корректно решать вопросы систематики, оценки потенциальной рудоносности и условий формирования таких массивов. В свете сказанного остаются актуальными исследования, позволяющие расширить информационную базу геохимических данных по таким массивам. В определенной мере решению этой задачи могут способствовать полученные нами новые данные по геохимии Шаманского массива, которые обсуждаются ниже.

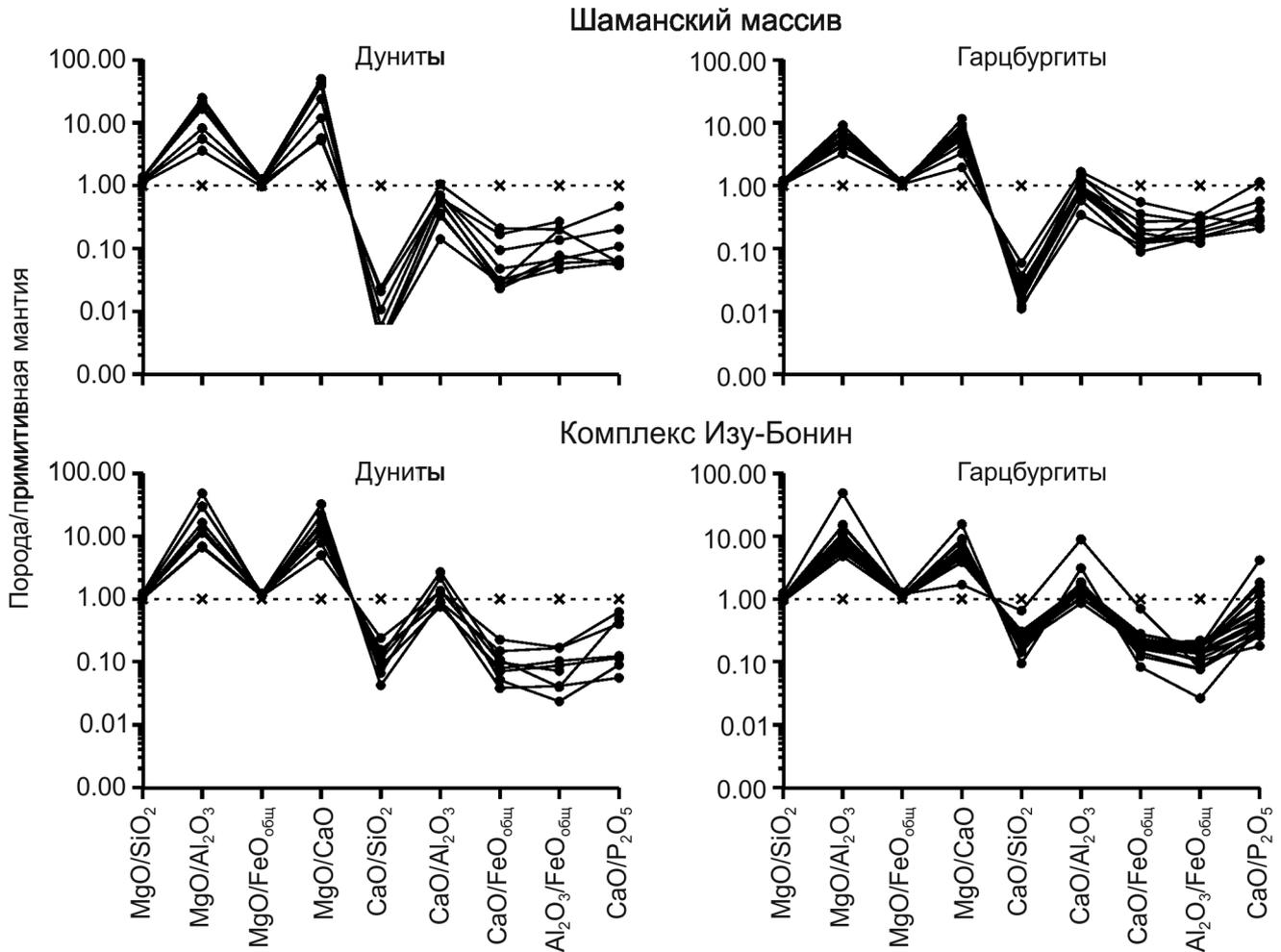
#### *Редкие элементы*

Как отмечалось, геохимические исследования ультрамафитов из Шаманского массива были выполнены с применением ряда традиционных и более современных аналитических методов. Методом РФА-СИ в дунитах и гарцбургитах массива определены содержания 19 элементов-примесей (табл. 2, рис. 4). По этим данным содержания  $\text{Ni}$  в дунитах варьируют в интервале 2033–2576 г/т, в гарцбургитах они несколько ниже (1806–2405 г/т). Содержания  $\text{Sr}$  в дунитах и гарцбургитах изменяются примерно в одинаковых интервалах: 3444–7433 и 3257–7839 г/т соответственно. Содержания  $\text{V}$  в дунитах (10.3–32.5 г/т) немного ниже, чем в гарцбургитах (10.9–40.6 г/т). Дуниты и гарцбургиты из Шаманского массива несколько обогащены  $\text{Ti}$  по сравнению с этими породами из комплекса Изу-Бонин. В породах из обоих комплексов наблюдается обратная зависимость между содержаниями  $\text{V}$  и  $\text{MgO}$ , а также прямая зависимость между  $\text{V}$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Кроме того, дуниты и гарцбургиты из Шаманского массива отличаются от этих пород



**Рис. 2.** Графики вариации содержаний MgO, CaO и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в дунитах и гарцбургитах из Шаманского массива (по данным табл. 1), пересчитанных на безводный состав, и из комплекса Изу-Бонин [32], а также графики вариации значений параметров Al/Si и Mg/Si (1 – дуниты, 2 – гарцбургиты). Звездочкой обозначена фигуративная точка для пиролита.

**Fig. 2.** The graphs of variation of MgO, CaO and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contents in dunites and harzburgites from the Shaman massif (data Table 1), recalculated on the dry matter, and from Izu-Bonin complex [32], and graphs values variation of parameters Al/Si and Mg/Si (1 – dunites, 2 – harzburgites). An asterisk denotes figurative point for pyrolite.



**Рис. 3.** Графики вариации значений петрохимических параметров, нормированных по составу примитивной мантии [25], для дунитов и гарцбургитов из Шаманского массива (по данным табл. 1), а также из комплекса Изу-Бонин [32].

**Fig. 3.** The graphs of variation values petrochemical parameters of normalized to the primitive mantle composition [25] for dunites and harzburgites from Shaman massif (data Table 1), and from Izu-Bonin complex [32].

из комплекса Изу-Бонин значительно более высокими содержаниями Zr (рис. 5). На спектрах распределения хондрит-нормированных содержаний элементов-примесей в дунитах и гарцбургитах из Шаманского массива наблюдаются интенсивные положительные аномалии Zr, а также менее интенсивные отрицательные аномалии Sr, V и Cu (рис. 6).

Масс-спектрометрическим методом с индуктивно связанной плазмой и лазерной абляцией (LA ICP-MS) в ультрамафитах из Шаманского массива определены содержания 37 элементов-примесей, в том числе редкоземельных элементов (табл. 3). Эти результаты подтвердили приведенные выше данные, полученные методом РФАСИ, свидетельствующие о том, что ультрамафиты из этого массива характеризуются повышен-

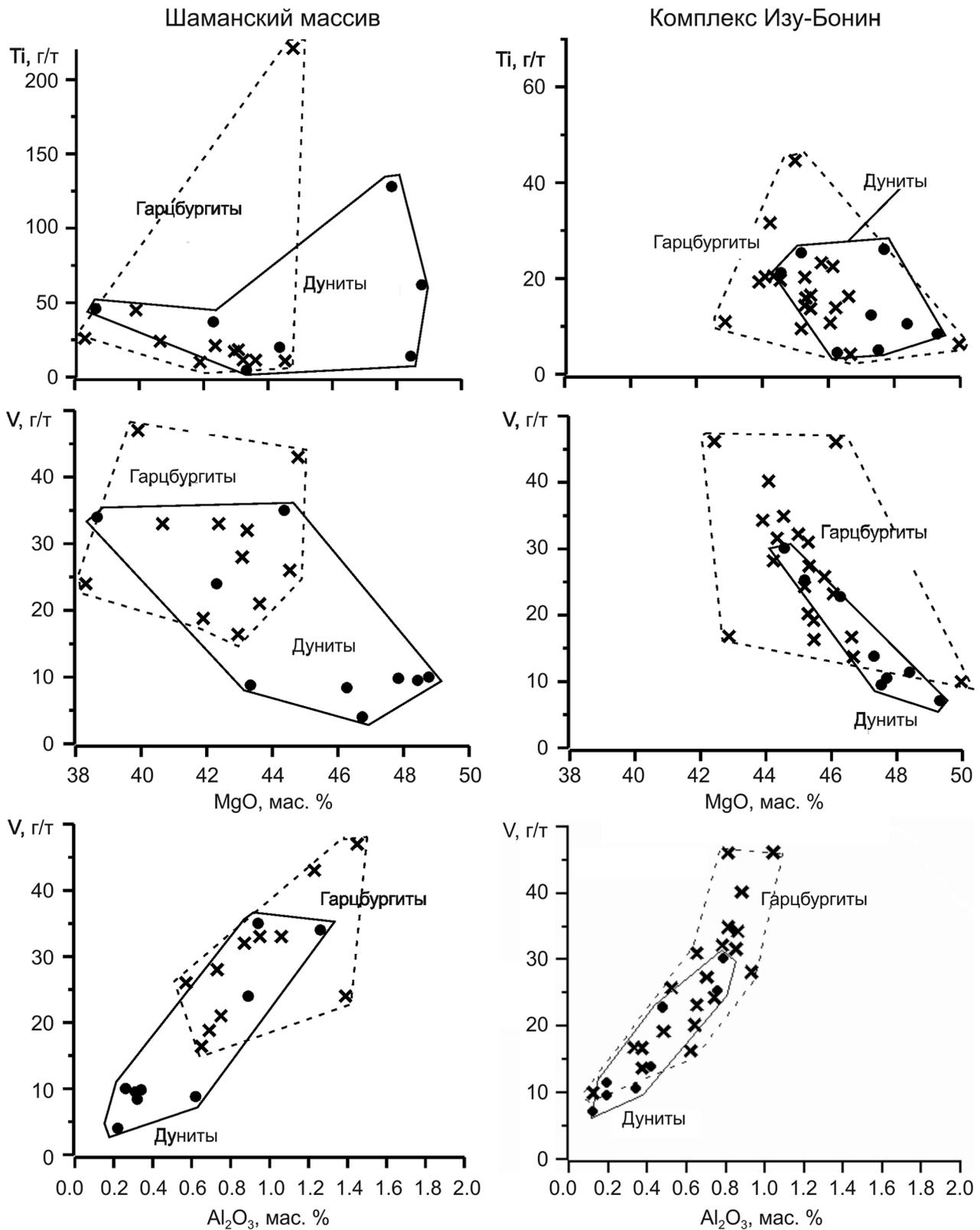
ными содержаниями Zr и Hf. Соответственно, на спектрах распределения хондрит-нормированных средних содержаний элементов-примесей в дунитах и гарцбургитах из Шаманского массива, построенных по данным метода LA ICP-MS, наблюдаются интенсивные положительные аномалии Zr и Hf (рис. 7). В дунитах и гарцбургитах из комплекса Изу-Бонин содержания Zr и Hf намного ниже, чем в породах из Шаманского массива, из-за чего на их спектрах наблюдаются интенсивные отрицательные аномалии этих элементов. В ультрамафитах из обоих комплексов наблюдается отчетливая положительная корреляция между содержаниями Zr и Hf (рис. 8). Это позволяет утверждать, что главным концентратором этих двух элементов в ультрамафитах из обоих комплексов является аксессуарный циркон, и что количество неравно-

**Таблица 2.** Содержание элементов-примесей в дунитах и гарцбургитах из Шаманского массива  
**Table 2.** Trace element contents in dunites and harzburgites from Shaman massif

Элементы	Дуниты																Гарцбургиты															
	Номера образцов																															
	Ш-1/4	Ш-2/2	Ш-4/1	Ш-5/3	Ш-6/1	Ш-24/2	Ш-27/1	Ш-33/6	Ш-1/5	Ш-4/3	Ш-5/4	Ш-10/4	Ш-17/6А	Ш-17/6Б	Ш-23/1	Ш-24/2	Ш-29/4	Ш-41/7	Ш-42/2	Ш-43/6												
K, %	—	0.023	—	0.017	—	—	—	0.043	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.021	—	—												
Ca, %	0.083	0.096	0.078	0.091	0.709	0.331	0.598	1.78	0.282	0.962	0.439	0.414	0.29	0.417	0.331	0.66	0.816	0.468	0.59													
Ti, %	0.011	0.037	0.012	0.013	0.009	0.015	0.015	0.014	0.01	0.008	0.011	0.014	0.011	0.012	0.01	0.015	0.032	0.012	0.009													
V, г/т	—	12.6	23.8	15.1	32.5	24.4	29.9	40.5	32.2	20.2	14.7	18.2	10.9	20.7	24.4	40.6	38.3	25.8	16.1													
Cr, г/т	4047	3444	4398	7433	4590	4341	5194	4564	4590	3545	2276	3455	3634	3257	4341	7839	4931	4969	3605													
Mn, %	0.133	0.127	0.119	0.176	0.143	0.155	0.148	0.14	0.089	0.11	0.129	0.159	0.154	0.118	0.155	0.153	0.135	0.162	0.147													
Fe, %	7.1	6.88	6.75	8.37	7.38	7.88	7.44	7.35	6.35	5.96	6.79	8.19	7.77	6.57	7.88	7.41	7.0	7.92	7.74													
Ni, г/т	2242	2415	2033	2795	2124	2405	2576	2016	2032	1847	1806	2178	2072	2038	2405	2180	1996	2152	2234													
Cu, г/т	12.2	12.8	12.6	13.3	11.1	10.2	11.4	15.2	124	11.8	9.84	11.1	13.9	17.0	10.2	9.67	13.9	9.83	13.2													
Zn, г/т	175	54.1	52.3	138	96	123	192	72	55	50.6	47.5	62	56	250	123	103	111	76	58													
Pb, г/т	2.34	1.67	8.64	1.33	1.16	2.07	4.63	1.48	7.32	1.62	2.65	1.79	1.58	3.23	2.07	1.34	1.04	1.79	3.48													
Ga, г/т	4.14	3.65	4.94	3.79	4.0	3.72	5.25	5.22	2.79	4.71	4.74	3.39	4.46	4.18	3.72	4.81	4.47	4.65	5.82													
Rb, г/т	1.69	1.96	1.45	2.83	2.26	2.48	2.46	2.14	1.52	1.54	2.1	2.85	2.56	1.69	2.48	2.3	2.88	2.28	2.45													
Sr, г/т	0.48	49.8	0.73	1.09	0.81	2.34	6.06	0.38	0.5	—	0.63	0.84	0.32	0.73	2.34	0.50	1.45	2.66	0.90													
Y, г/т	—	0.26	—	0.22	—	—	0.95	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.31	—	—													
Zr, г/т	77	106	30	122	181	51.5	266	56	17	11	55	58	25.6	28.3	51.5	33.8	164	43.3	59.0													
Nb, г/т	—	0.29	—	—	—	—	—	2.34	0.27	0.58	0.50	1.4	—	0.47	—	0.3	1.65	0.74	0.66													
Mo, г/т	5.39	3.04	—	1.8	2.8	—	2.21	—	9.87	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—													
As, г/т	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—													

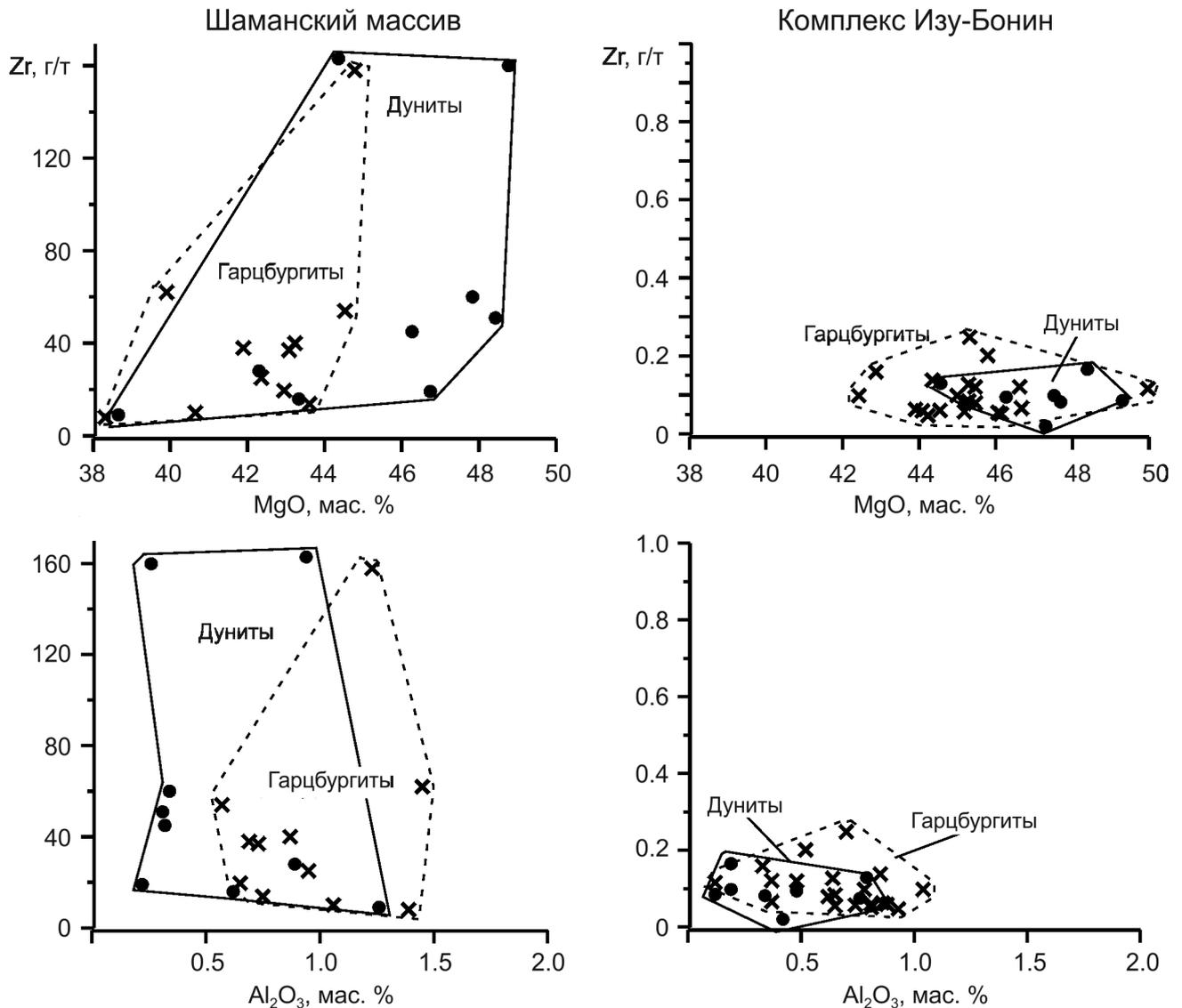
Примечание. Анализы выполнены методом РФА-СИ в аналитическом центре ИГМ СО РАН (исполнитель Ю.П. Колмогоров). Прочерк – нет данных.

Note. X-ray fluorescent-synchronous analyses were performed in the Analytical Center of IGM SB RAS (analyst Yu.P. Kolmogorov). Dash – no data.



**Рис. 4.** Соотношение между содержаниями Ti, V и содержаниями MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в дунитах и гарцбургитах из Шаманского массива (по данным табл. 1, 2), а также из комплекса Изу-Бонин [32].

**Fig. 4.** The relations between Ti, V and MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contents in dunites and harzburgites from Shaman massif (data Table 1, 2) and from Izu-Bonin complex [32].



**Рис. 5.** Соотношение между содержаниями Zr и MgO,  $Al_2O_3$  в дунитах и гарцбургитах из Шаманского массива (по данным табл. 1, 3), а также и из комплекса Изу-Бонин [32].

**Fig. 5.** The relations between Zr and MgO,  $Al_2O_3$  contents in dunites and harzburgites from Shaman massif (data Table 1, 3), and from Izu-Bonin complex [32].

мерно распределенных зерен этого минерала в ультрамафитах из Шаманского массива намного больше, чем в этих породах из комплекса Изу-Бонин. В дальнейшем это предположение удалось подтвердить результатами минералогического анализа искусственного шлиха сборной пробы, составленной из отобранных в разных точках Шаманского массива штучных образцов ультрамафитов общим весом около 6 кг. При этом в шлихе было обнаружено более 10 зерен циркона размером менее 250 микрон, которые в дальнейшем предполагается датировать U-Pb изотопным методом.

#### Редкоземельные элементы

Согласно результатам анализов, выполненных методом LA ICP-MS, ультрамафиты из Шаманского массива в значительной мере истощены редкоземельными элементами (РЗЭ), которые распределены в них очень неравномерно (см. табл. 3). Так, в дунитах их суммарные содержания изменяются в интервале от 0.12 до 1.54 г/т, что меньше, чем в хондрите CI. В гарцбургитах этот интервал несколько шире – от 0.29 до 3.01 г/т. В ультрамафитах из комплекса Изу-Бонин суммарные содержания

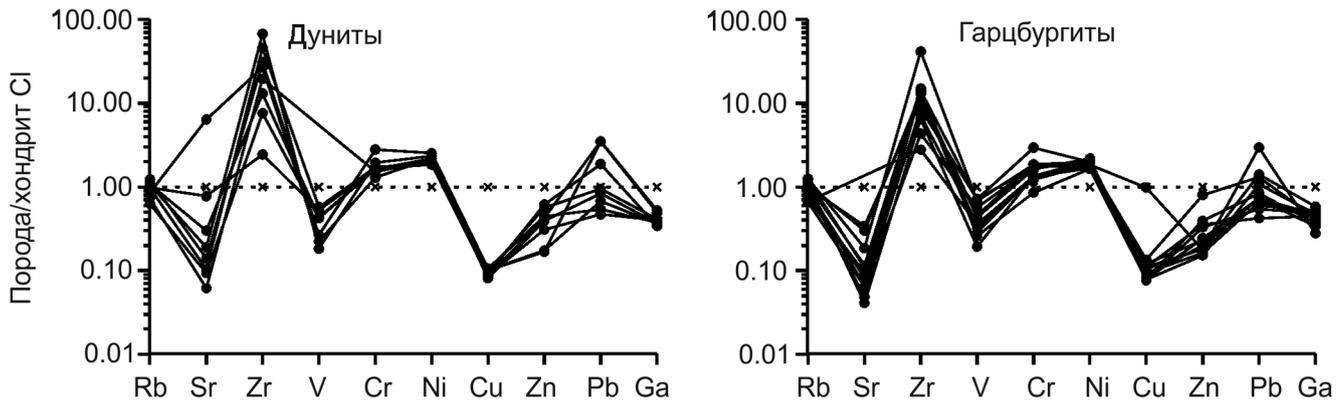


Рис. 6. Спектры распределения хондрит-нормированных содержаний элементов-примесей в дунитах и гарцбургитах из Шаманского массива (по данным табл. 2).

Fig. 6. The patterns of distribution of chondrite-normalized trace elements contents in dunites and harzburgites from Shaman massif (data Table 2).

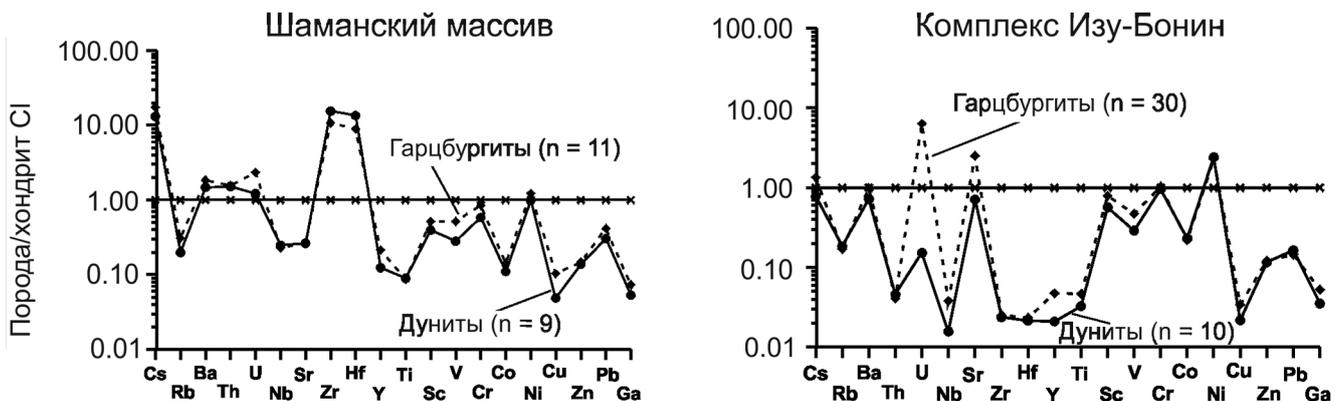


Рис. 7. Спектры распределения хондрит-нормированных средних содержаний элементов-примесей в дунитах и гарцбургитах из Шаманского массива (по данным табл. 3), а также из комплекса Изу-Бонин [32]. Нормирование выполнено по хондриту CI [30].

Fig. 7. The patterns of distribution of chondrite-normalized average contents of trace elements in dunites and harzburgites from Shaman massif (data Table 3), and from Izu-Bonin complex [32]. Normalization was carried out on the basis of chondrite CI [30].

РЗЭ еще ниже: в дунитах – от 0.0198 до 0.0569 г/т, в гарцбургитах – от 0.0288 до 0.1624 г/т [32]. Полученные данные о содержаниях РЗЭ в ультрамафитах из Шаманского массива согласуются с рассчитанными ранее средними оценками их суммарных содержаний РЗЭ в реститогенных ультрамафитах: для дунитов – 0.89 г/т ( $n = 45$ ), для гарцбургитов – 1.8 г/т ( $n = 114$ ) [11].

Спектры распределения хондрит-нормированных содержаний РЗЭ в дунитах и гарцбургитах из Шаманского массива имеют дугообразно изогнутую книзу конфигурацию и общий отрицательный наклон, что свидетельствует об их относительном обогащении легкими элементами по сравнению со средними и тяжелыми элементами (рис. 9). На это ука-

зывают и значения параметра  $(La/Yb)_n$ , которые для всех проанализированных образцов пород превышают 1: для дунитов – от 1.01 до 5.23, для гарцбургитов – от 1.50 до 7.50. Значения параметра  $(Eu/Eu^*)_n$  в пределах общей коллекции образцов ультрамафитов из Шаманского массива изменяются в интервале от 0.77 до 1.28. При этом преобладают разновидности пород, в которых его значения меньше 1. Аномальное обогащение ультрамафитов данного массива легкими РЗЭ отмечалось в некоторых их образцах и ранее [27]. Подобное обогащение легкими РЗЭ наблюдается и в ультрамафитах из комплекса Изу-Бонин, но при этом почти все эти породы имеют хондрит-нормированные спектры с общим положительным наклоном, причем на многих из них при-

**Таблица 3.** Содержание редкоземельных и редких элементов в дунитах и гарцбургитах из Шаманского массива, г/т  
**Table 3.** Rare earth and rare elements composition of dunites and harzburgites from Shaman massif, ppm

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

Элементы и параметры	Гарцбургиты											
	Номера образцов											
	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	Пределы обнаружения элементов
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

Таблица 3. Окончание

Table 3. Ending

Элементы и параме- тры	Гарцбургиты											Пределы об- наружения элементов
	Номера образцов											
	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	
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) <sub>n</sub>	2.46	1.24	1.50	2.69	7.50	2.64	1.55	2.83	2.57	3.03	3.18	–
(Eu/Eu*) <sub>n</sub>	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

Примечание. Анализы выполнены методом LA ICP-MS в Аналитическом центре ИГМ СО РАН (исполнитель С.В. Палесский). Прочерк – нет данных.

Note. Analyses carried out by LA ICP-MS in Analytical Center IGM SB RAS (analyst S.V. Palesskii). Dash – no data.

сутствуют малоинтенсивные положительные аномалии Eu (см. рис. 9).

Аномальное обогащение легкими РЗЭ и соответствующая этому дугообразно изогнутая книзу конфигурация их спектров были установлены в большинстве проанализированных образцов ультрамафитов из многих массивов, входящих в состав офиолитовых ассоциаций, в том числе таких, как Твин Систерс, Тетфорд Майнс, Тринити, Сюд, Парамский, массивы Новой Каледонии. Аналогичные данные были получены по ультрамафитам из глубоких ксенолитов в щелочных базальтах из большинства их проявлений, например, на о. Кергелен, в Западной Германии, из палеовулкана Шаварын Царам (Монголия) и ряда других. Вместе с тем, подобное

обогащение ультрамафитов легкими РЗЭ не согласуется с представлениями об их образовании в качестве реститов – тугоплавкого остатка при частичном плавлении верхнемантийных протолитов. При объяснении этого феномена исследователи длительное время предполагали, что обогащение ультрамафитовых реститов неструктурной примесью РЗЭ было обусловлено процессами верхнемантийного метасоматоза. Более поздние наблюдения показали, что такое обогащение легкими РЗЭ ультрамафитов и их минералов из мафит-ультрамафитовых массивов, а также и из глубоких ксенолитов, могло быть обусловлено привнесением этих примесей при инфильтрации эпигенетических флюидов, выделявшихся из расплавов, формировавших более поздние интрузи-

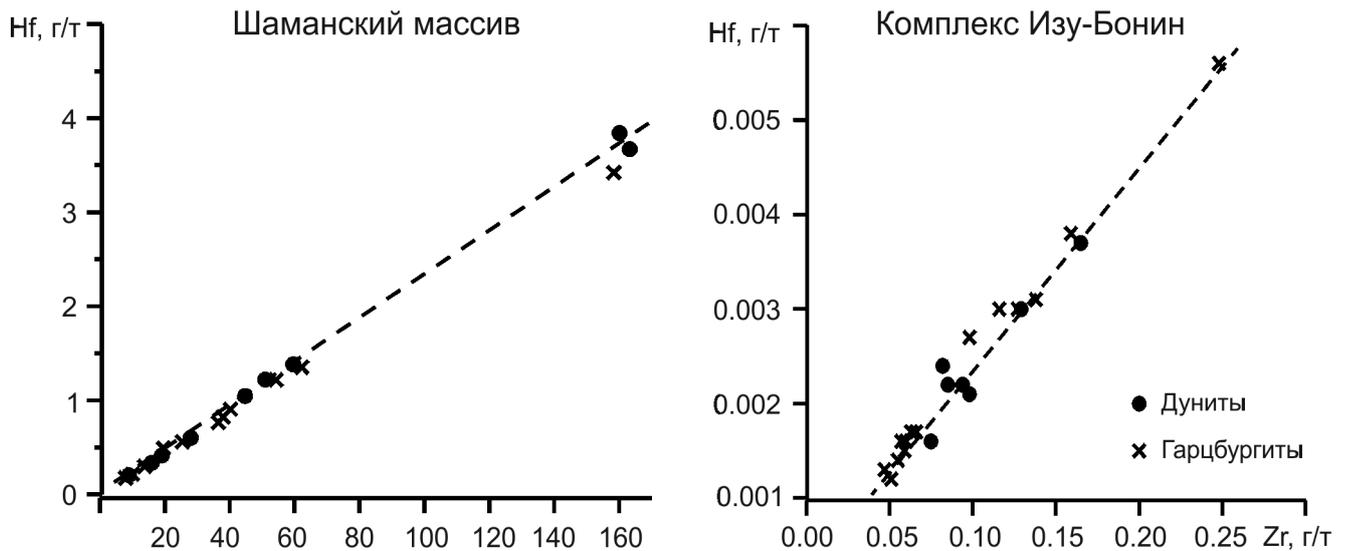


Рис. 8. Графики вариации содержаний Zr и Hf в дунитах и гарцбургитах из Шаманского массива (по данным табл. 3) и из комплекса Изу-Бонин [32].

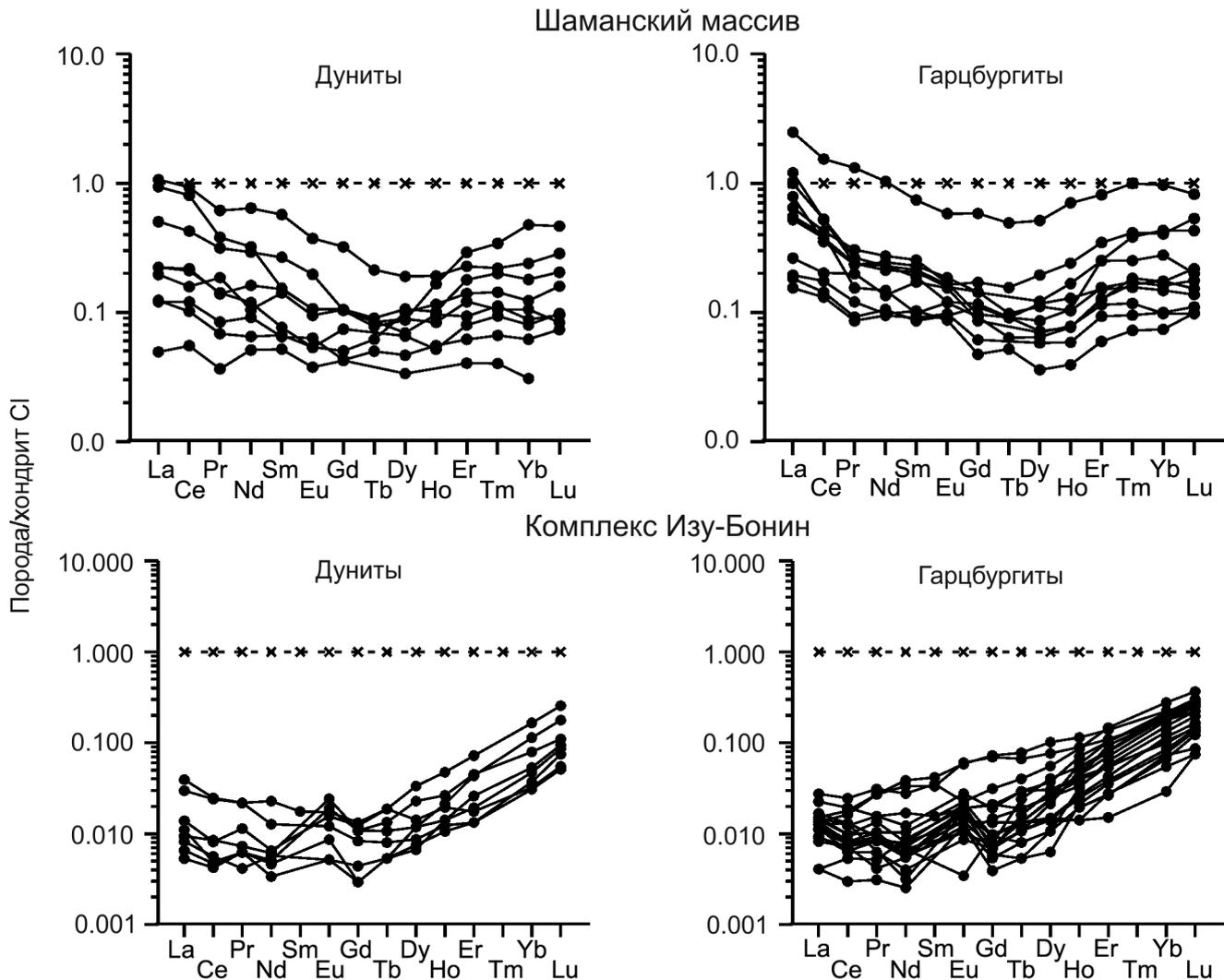
Fig. 8. The graphs of variation Zr and Hf contents in dunitites and harzburgites from Shaman massif (data Table 3), and from Izu-Bonin complex [32].

вы основного или кислого состава, а в случае с ультрамафитами из глубинных ксенолитов – из переносивших эти ксенолиты базальтовых расплавов [9]. Вследствие такого рода процессов в трещинах пород и их минералов отлагалась неструктурная примесь легких РЗЭ и других подвижных элементов, представленная легко растворимыми соединениями, в том числе микрочастицами апатита [11, 15]. Вместе с тем, не исключается возможность привноса неструктурной примеси подвижных элементов, включая РЗЭ, в породы ультрамафитовых массивов и в процессе их инфильтрации метеорными водами. Таким образом, можно считать, что только незначительная часть легких РЗЭ находится в реститогенных ультрамафитах непосредственно в их минералах, прежде всего в клинопироксенах, в виде структурной примеси. Более значительные количества легких РЗЭ и других подвижных элементов находятся в этих породах в виде неструктурной примеси, сосредоточенной, в межзерновых и внутризерновых микротрещинах, а также во флюидных микровключениях.

В свете сказанного представляют интерес наблюдения Н.В. Вахрушевой и В.Ю. Алимова [2], которые изучили распределение РЗЭ в дунитах, гарцбургитах и хромититах из керна скважин, пройденных на одном из участков Войкаро-Сыннинского массива (Полярный Урал). По их данным, в образцах ультрамафитов, слагающих висячие и лежащие экзоконтактовые зоны залежей хромититов, были выявлены аномально повышенные содержания легких РЗЭ. То есть вблизи залежей хромититов наблюдались своеобразные геохимические ореолы

обогащения РЗЭ. Наряду с повышенными содержаниями легких РЗЭ в этих ореолах были выявлены повышенные содержания тяжелых РЗЭ, а также Rb, Cs, Ba, Cd, Bi и Pb. Эти данные позволили авторам предположить, что формирование залегающих в ультрамафитах хромитовых залежей сопровождалось инфильтрацией флюидов, обогащенных легкоподвижными элементами-примесями.

С учетом сказанного выше можно констатировать, что те концентрации легких РЗЭ в ультрамафитах, которые обычно определяются по результатам анализов их валовых проб, не вполне корректно отражают истинный уровень накопления этих примесей, соответствующий уровню их накопления в ультрамафитовых реститах, которые изначально сформировались в верхней мантии в качестве тугоплавкого продукта частичного плавления верхнемантийных протолитов. В лучшем случае такому изначальному уровню накопления могут соответствовать содержания более совместимых тяжелых РЗЭ, прежде всего Yb. Как было показано, в дунитах из Шаманского массива содержания этого элемента находятся в интервале от 0.005 до 0.079 г/т, в гарцбургитах – от 0.012 до 0.16 г/т. Для сравнения отметим, что в ультрамафитах из комплекса Изу-Бонин определены более низкие содержания Yb: в дунитах – от 0.0051 до 0.0273 г/т, в гарцбургитах – от 0.0048 до 0.0457 г/т [32]. На этом основании можно предполагать, что ультрамафиты из Шаманского массива были сформированы при более низких степенях частичного плавления верхнемантийного протолита по сравнению с ультрамафитами из комплекса Изу-Бонин, но при том условии, что



**Рис. 9.** Спектры распределения хондрит-нормированных содержаний редкоземельных элементов в дунитах и гарцбургитах из Шаманского массива (по данным табл. 3), а также из комплекса Изу-Бонин [32]. Нормирование выполнено по хондриту CI [30].

**Fig. 9.** The patterns of distribution of chondrite-normalized rare earth elements contents in dunites and harzburgites from Shaman massif (data Table 3), and from Izu-Bonin complex [32]. Normalization was carried out on the basis of chondrite CI [30].

протолиты в обоих случаях были геохимически сопоставимы. Из сказанного также следует, что более точные оценки первичного редкоземельного состава ультрамафитовых рествитов могут быть получены в том случае, если предназначенные для анализа навески валовых проб будут предварительно подвергаться кислотному выщелачиванию.

#### *Элементы платиновой группы*

Закономерности распределения элементов платиновой группы (ЭПГ) в породах из Шаманского массива ранее почти не изучались. Было лишь известно, что в единичных пробах хромититов, не-

большие залежи которых обнаружены в этом массиве, содержания Pt составили от 0.8 до 2.44 мг/т [21]. В дополнение к этим ограниченным сведениям нами были впервые получены данные о содержаниях шести ЭПГ, а также Re в представительных пробах дунитов и гарцбургитов из данного массива с применением метода ICP-MS. С учетом того, что ультрамафиты и, прежде всего, содержащиеся в них зерна хромшпинели, в которых преимущественно и сосредоточены микрочастицы минералов ЭПГ, трудно поддаются разложению и переводу в раствор, нами были применены два разных по эффективности способа кислотного разложения их навесок: 1) способ разложения в микроволновом

автоклаве MARS-5 при относительно низких температуре и давлении; 2) более эффективный способ разложения в трубке Кариуса при повышенных температуре и давлении [10].

Результаты определения ЭПГ в пробах ультрамафитов из Шаманского массива показали, что при их разложении в трубке Кариуса тугоплавкие ЭПГ (Os, Ir, Ru, Rh) более полно переходили в раствор (анализируемый методом ICP-MS), что позволило получить более точные оценки содержания этих элементов по сравнению с пробами, разложение которых проводили в автоклаве MARS-5 (табл. 4). Как следует из приведенных данных, в тех навесках проб, разложение которых проводилось в автоклаве MARS-5, суммарные содержания ЭПГ (без Rh) находились в интервале от 12.50 до 24.35 мг/т. В навесках тех же проб, которых были разложены в трубке Кариуса, суммарные содержания ЭПГ (включая Rh) находились в интервале от 21.87 до 29.99 мг/т. В последнем случае содержания Os в пробах увеличились в 1.5–14.6 раз по сравнению с оценками, полученными при разложении проб в автоклаве MARS-5, содержания Ir увеличились в 2.8–11.3 раз, содержания Ru – в 1.3–1.9 раз. Результаты анализов позволили предположить, что в ультрамафитах из Шаманского массива преобладают минеральные фазы ЭПГ, в которых ведущая роль принадлежит Ru. В тех навесках проб, которые анализировались после их разложения в трубке Кариуса, содержания Ir, Os и Ru находились в следующих соотношениях: 1:(0.77–1.99):(2.30–3.64). Это позволило предположить, что в ультрамафитах из Шаманского массива микрочастицы минеральных фаз ЭПГ преимущественно представлены существенно рутениевыми минералами, такими, как рутеносмирид (Ir, Os, Ru) и лаурит (RuS<sub>2</sub>).

Спектры распределения нормированных на примитивную мантию содержаний ЭПГ в проанализированных пробах ультрамафитов из Шаманского массива представляют собой дугообразно изогнутые кверху линии, свидетельствующие об относительном их обогащении Ru и Rh по сравнению с остальными ЭПГ (рис. 10). Ультрамафиты из этого массива характеризуются более низкими содержаниями Re (0.01–0.04 мг/т) по сравнению со средними оценками его содержаний, которые были ранее рассчитаны для гарцбургитов (0.09 мг/т) и дунитов (0.34 мг/т) [14]. Подобные по конфигурации спектры распределения нормированных по примитивной мантии содержаний ЭПГ и Re ранее наблюдались в ультрамафитах из Березовского мафит-ультрамафитового массива (о. Сахалин) [13]. Отметим, что дунитам из Шаманского массива по сравнению с представленными в нем гарцбургитами свойственны более низкие значения параметра Pd/Ir, что может свидетельствовать о более низкой степени частичного плавления верхнемантийного

**Таблица 4.** Содержание элементов платиновой группы и рения в дунитах и гарцбургитах из Шаманского массива, мг/т

**Table 4.** Platinum group elements and rhenium composition of dunites and harzburgites from Shaman massif, ppb

Элементы	Дуниты				Гарцбургит	
	Ш-1/3		Ш-2/2		Ш-1/5	
	Автоклав	Трубка	Автоклав	Трубка	Автоклав	Трубка
Os	1.30	7.61	2.00	3.07	0.20	2.92
Ir	0.34	3.85	1.08	3.00	1.05	3.03
Ru	7.35	14.02	4.44	8.53	8.78	6.96
Rh	–	1.10	–	1.60	–	2.00
Pt	2.30	2.20	4.50	5.01	10.40	9.78
Pd	1.21	1.21	0.68	0.66	3.92	3.95
Сумма	12.50	29.99	12.70	21.87	24.35	28.64
Re	0.04	0.04	0.02	0.08	0.02	0.01
Pd/Ir	3.56	0.31	0.63	0.22	3.73	1.30

Примечание. Анализы выполнены в Аналитическом центре ИГМ СО РАН методом ICP-MS с разложением проб в автоклаве MARS-5 и в трубке Кариуса (исполнители Р.А. Козьменко и И.В. Николаева). Прочерк – нет данных.

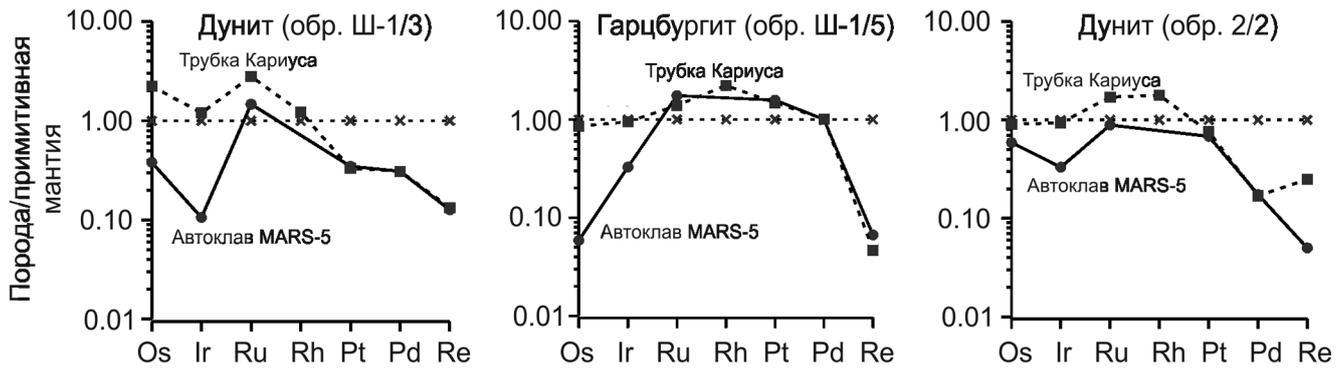
Note. ICP-MS analyses with decomposition samples in autoclave MARS-5 and in Carius tube were performed in the Analytical Center IGM SB RAS (analysts O.A. Koz'menko and I.V. Nikolaeva). Dash – no data.

протолита при образовании гарцбургитов по сравнению с дунитами.

Ранее при обобщении геохимических данных по ряду разнотипных мафит-ультрамафитовых массивов были выявлены признаки обратной зависимости между содержаниями ЭПГ и РЗЭ в слагающих их породах [12]. Свидетельства подобного “антагонизма” между ЭПГ и некоторыми РЗЭ выявлены и в ультрамафитах из Шаманского массива (рис. 11). Так, в этих породах прослеживается обратная зависимость между содержаниями Ru и содержаниями тяжелых РЗЭ (Er, Tm, Yb и Lu), а также между суммарными содержаниями ЭПГ и РЗЭ. В то же время, судя по графикам, в ультрамафитах массива прослеживается прямая зависимость между содержаниями Pt и содержаниями тяжелых РЗЭ. В целом полученные данные по геохимии ЭПГ и РЗЭ в ультрамафитах из Шаманского массива согласуются с моделью их формирования в качестве верхнемантийных реститов.

#### *Химический состав оливинов и других минералов*

Как отмечалось, главными минералами ультрамафитов Шаманского массива являются оливин и ортопироксен, в некоторых разновидностях гарцбургитов встречалась примесь клинопироксена. Аксессуары представлены главным образом хромшпинелью. Зерна оливина в различной мере подверглись пластическим деформациям и за-



**Рис. 10.** Спектры распределения нормированных по примитивной мантии [31] содержаний элементов платиновой группы и рения в дунитах (обр. Ш-1/3 и Ш-2/2) и гарцбургите (обр. Ш-1/5) из Шаманского массива (по данным табл. 4).

**Fig. 10.** The patterns of distribution of normalized on primitive mantle [31] contents of platinum group elements and rhenium in dunites (samples Ш-1/3 and Ш-2/2) and in harzburgite (sample Ш-1/5) from Shaman massif (data Table 4).

мещению серпентином и вторичным магнетитом, зерна ортопироксена частично замещены тонкодисперсным агрегатом вторичных минералов. По нашим данным, значения параметра магнезиальности ( $Fo$ ) в оливинах из дунитов (91.9 и 92.8%) и из гарцбургитов (91.5 и 92.1%) отличаются незначительно (табл. 5). Согласно более ранним данным Е.Е. Пугачевой [24], среднее значение параметра  $Fo$  в оливинах из дунитов из Шаманского массива, имеющих порфинокластовую микроструктуру, составляет 92.3%; в разновидностях минерала, имеющих порфиroleйстовую микроструктуру, – 91.7%. А.А. Цыганков [27] привел данные, согласно которым среднее значение параметра  $Fo$  в оливинах из Шаманского массива составляет 90.5%; среднее содержание  $NiO$  – 0.39 мас. %; в ортопироксенах среднее значение параметра магнезиальности ( $En$ ) составило 91.4%, в клинопироксенах – 94.1%; среднее значение показателя хромистости ( $Cr\#$ ) в хромшпинелях – 46.4%.

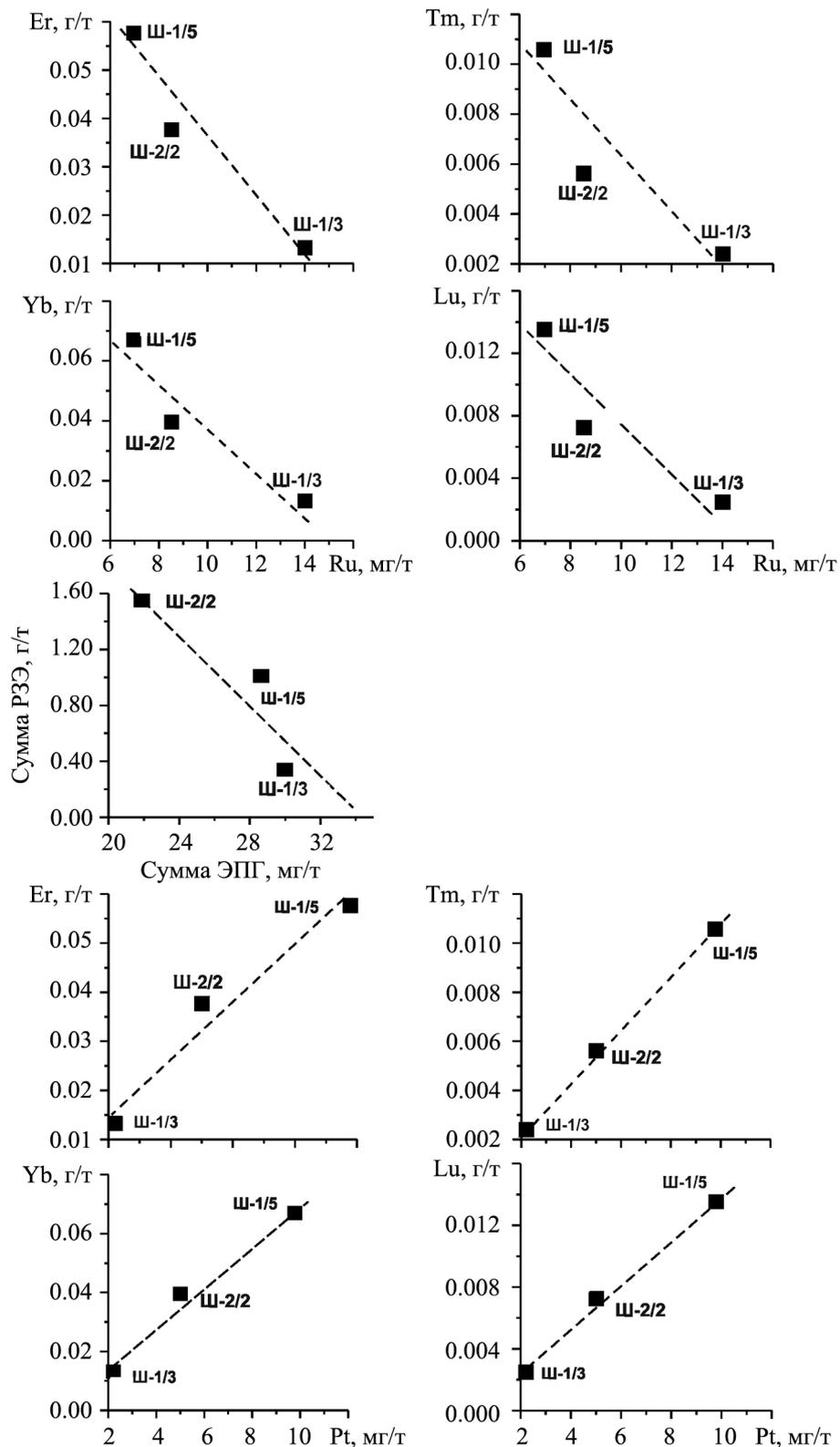
#### Редкоземельные элементы в оливинах

В небольшой коллекции мономинеральных проб оливинов из дунитов и гарцбургитов Шаманского массива ранее были определены содержания редкоземельных элементов и флюидных компонентов [18]. При этом было установлено, что оливины характеризуются переменными и в целом очень низкими содержаниями РЗЭ, суммарные содержания которых составили от 0.29 до 2.76 г/т; значения параметра  $(La/Yb)_n$  в них варьировали от 1.35 до 11.76 (табл. 6). Оливин из обр. Ш-5/4, обладающий протогранулярной микроструктурой и, как предполагалось, подвергшийся пластическим деформациям в условиях верхней мантии, по общему уровню накопления РЗЭ близок к хондриту С1. Спектр распределения хондрит-нормированных содержа-

ний РЗЭ в этом образце оливина представлен линией с пологим отрицательным наклоном в области легких элементов и субгоризонтальной линией – в области средних и тяжелых элементов (рис. 12). В оливинах, которые были пластически деформированы в условиях земной коры (обр. Ш-16/6, Ш-26/1, Ш-2/2), наблюдались более низкие содержания РЗЭ и более сложная конфигурация спектров, обусловленная присутствием на них аномалий  $Eu$ . Различия рассматриваемых образцов оливинов в отношении уровня накопления РЗЭ и характера спектров их распределения, очевидно, обусловлены различиями в степени пластического деформирования слагаемых ими ультрамафитов. Максимальные концентрации РЗЭ установлены в оливине из дунита с протогранулярной микроструктурой (обр. Ш-5/4). В оливинах, которые претерпели интенсивные пластические деформации (обр. Ш-16/6, Ш-26/1, Ш-2/2) отмечена тенденция к уменьшению концентрации РЗЭ. Процессы пластического деформирования ультрамафитов протекали в ходе перемещения тела ультрамафитов от уровней верхней мантии до разных уровней земной коры и, по видимому, сопровождалась центробежной диффузией ионов РЗЭ из кристаллической структуры оливинов. Предполагается, что химический состав и уровень накопления РЗЭ в оливине из обр. Ш-5/4 сопоставим с составом оливина из исходных верхнемантийных реститов.

#### Флюидные компоненты в оливинах

В нескольких монофракционных пробах оливинов из ультрамафитов Шаманского массива, наряду с РЗЭ, газохроматографическим методом были определены содержания некоторых газов (летучих компонентов) –  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$  и  $H_2$  [18]. Навески этих монофракций предварительно бы-



**Рис. 11.** Соотношение между содержаниями Ru, Pt, а также суммарными содержаниями ЭПГ (по данным табл. 4) и содержаниями тяжелых редкоземельных элементов, а также суммарными содержаниями РЗЭ (по данным табл. 3) в дунитах (обр. Ш-1/3, Ш-2/2) и гарzburgите (обр. Ш-1/5) из Шаманского массива.

**Fig. 11.** The relations between Ru и Pt contents, summa of PGE (data Table 4) and contents of heavy REE and summa REE (data Table 3) in dunitites (sample Ш-1/3, Ш-2/2) and harzburgite (sample Ш-1/5) from Shaman massif.

**Таблица 5.** Химический состав и типы микроструктуры оливинов из дунитов и гарцбургитов Шаманского массива, мас. %

**Table 5.** Chemical composition and microstructure types of olivines from dunites and harzburgites of Shaman massif, wt %

№ обр	Порода	SiO <sub>2</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	NiO	Сумма	Fo, %	S
Ш-2/2	Дунит	41.17	7.82	0.09	50.83	0.01	0.37	100.3	92.8	ПЛ
Ш-26/1	Дунит	41.76	8.62	0.17	49.45	He обн.	He опр.	100.0	91.9	ПК
Ш-5/4	Гарцбургит	41.91	8.87	0.09	48.09	He обн.	0.36	99.94	91.5	ПГ
Ш-16/6	Гарцбургит	40.39	8.60	He обн.	50.64	0.02	0.35	100.0	92.1	ПК

Примечание. Анализы выполнены рентгеноспектральным методом в Аналитическом центре ИГМ СО РАН (исполнитель В.Н. Королук). Fo, % = 100Mg/(Mg + Fe) (формульные единицы). S – типы микроструктуры оливинов: ПГ – протогранулярный, ПК – порфирикластовый, ПЛ – порфиroleйстовый.

Note. X-ray spectroscopy analyses were performed in the Analytical Center IGM SB RAS (analyst V.N. Korolyuk). Fo, % = 100Mg/(Mg + Fe) (formula units). S – types of olivine microstructure: ПГ – prothogranularity; ПК - porphiroclastic; ПЛ – porphiroleystic.

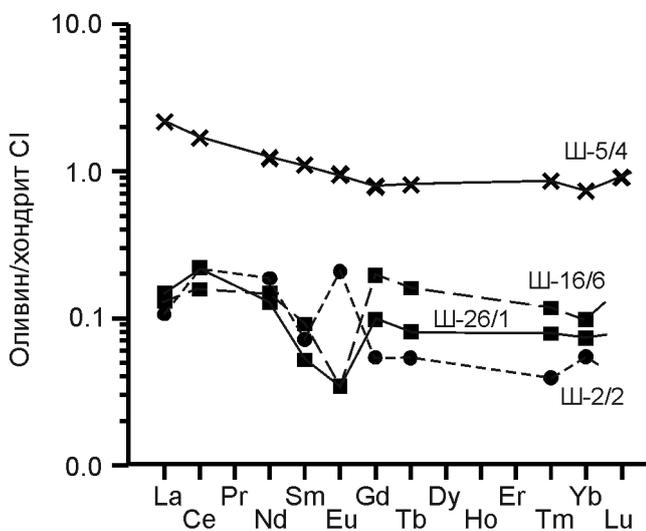
**Таблица 6.** Содержание редкоземельных элементов в оливинах из гарцбургитов и дунитов Шаманского массива, г/т

**Table 6.** Rare earth element composition of olivines from harzburgites and dunites of Shaman massif, ppm

Компоненты	Дуниты		Гарцбургиты		
	Номера образцов				
	Ш-26/1	Ш-2/2	Ш-5/4	Ш-16/6	Ш-7/2
La	0.036	0.028	0.530	0.032	0.400
Ce	0.140	0.140	1.070	0.100	0.740
Nd	0.600	0.088	0.580	0.070	0.270
Sm	0.008	0.011	0.170	0.014	0.070
Eu	0.002	0.012	0.055	0.002	0.090
Gd	0.020	0.011	0.160	0.040	0.080
Tb	0.003	0.002	0.030	0.006	0.020
Tm	0.002	0.001	0.022	0.003	0.006
Yb	0.012	0.009	0.120	0.016	0.023
Lu	0.002	0.001	0.023	0.004	0.005
Сумма	0.285	0.301	2.760	0.287	1.704
(La/Yb) <sub>n</sub>	2.03	1.95	2.98	1.35	11.76
Тип микроструктуры оливинов	Порфирикластовый	Порфиroleйстовый	Протогранулярный	Порфирикластовый	

Примечание. Анализы выполнены нейтронно-активационным методом с радиохимической пробоподготовкой в Аналитическом центре ИГМ СО РАН [16].

Note. Neutron activation analyses with radiochemical sample preparation were performed in the Analytical Center IGM SB RAS [16].



**Рис. 12.** Спектры распределения хондрит-нормированных содержаний редкоземельных элементов в оливинах из ультрамафитов Шаманского массива (по данным табл. 6).

Обр. Ш-5/4 – гарцбургит (протогранулярная микроструктура); обр. Ш-16/6 – гарцбургит (порфирикластовая микроструктура); обр. Ш-26/1 – дунит (порфирикластовая микроструктура); обр. Ш-2/2 – дунит (порфиroleйстовая микроструктура). Нормирование выполнено по хондриту CI [30].

**Fig. 12.** The patterns of distribution of chondrite-normalized contents of REE in olivines from ultramafites of Shaman massif (data Table 6).

Sample Ш-5/4 – harzburgite (prothogranularity microstructure); sample Ш-16/6 – harzburgite (porphiroclastic microstructure); sample Ш-26/1 – dunite (porphiroclastic microstructure); sample Ш-2/2 – dunite (porphiroleystic microstructure). Normalization was carried out on the basis of chondrite CI [30].

**Таблица 7.** Содержание летучих компонентов в оливинах из дунитов и гарцбургитов Шаманского массива, выделенных при режимах нагрева навесок проб при 650°C и 1100°C, мг/кг**Table 7.** The content of fluid components in olivine from dunites and harzburgites of Shaman massif, allocated at temperatures of 650°C and 1100°C, ppb

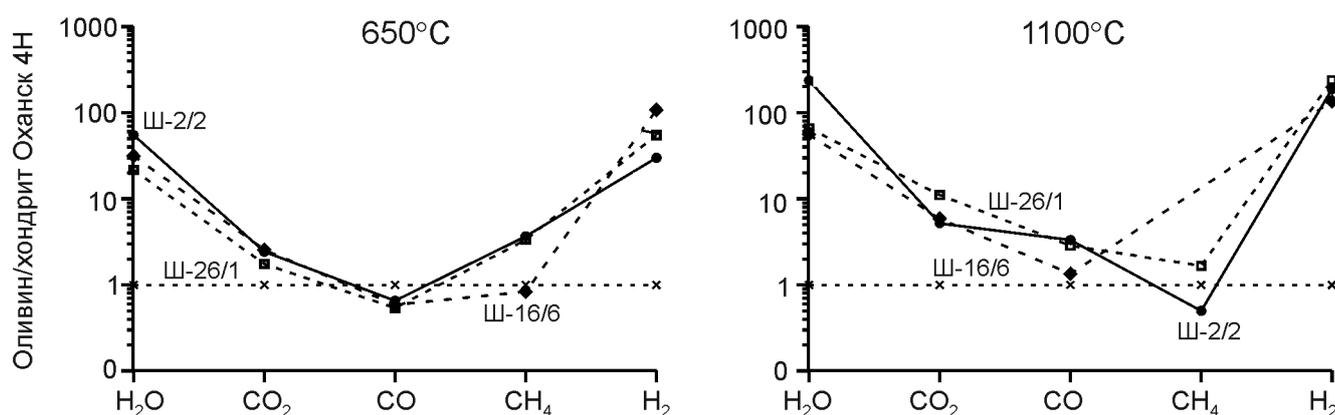
№№ обр.	Порода	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub>	Суммарные содержания восстановленных компонентов (CO, CH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> )	Суммарные содержания всех компонентов
Температура 650°C								
Ш-2/2	Дунит	4392	184	40	22	12	74	4650
Ш-26/1	Дунит	1720	133	33	20	22	75	1928
Ш-16/6	Гарцбургит	2525	194	36	5	43	84	2803
Температура 1100°C								
Ш-2/2	Дунит	18898	394	202	3	75	280	19572
Ш-26/1	Дунит	5284	842	174	10	95	179	6405
Ш-16/6	Гарцбургит	4464	447	82	Сл.	54	136	5047
Хондрит	Оханск Н4	80	76	61	6	0.4	67.4	223

Примечание. Анализы выполнены газохроматографическим методом в ИГМ СО РАН (исполнители С.В. Ковязин и Л.Н. Фомина). Содержание флюидных компонентов в хондрите Оханск Н4 [26].

Note. Analyses carried out by gas chromatography in the IGM SB RAS (analysts S.V. Kovyazin and L.N. Fomina). The content of fluid components in chondrite Okhansk H4 [26].

ли протестированы методом декрипитации, в результате чего было установлено, что наиболее интенсивное газовыделение из них произошло при трех температурных режимах: 350, 650 и 1100°C. После тестирования методом декрипитации были взяты отдельные навески монофракций оливинов (100 мг), которые подверглись анализу на газохроматографической установке при двух температурных режимах – 650 и 1100°C. По результатам этих анализов определено, что при обоих режимах нагрева из оливинов выделялись смеси газов, в которых в массовом выражении преобладали окисленные компоненты – H<sub>2</sub>O и CO<sub>2</sub>; в значительно меньших количествах из них выделялись

восстановленные компоненты – CO, CH<sub>4</sub> и H<sub>2</sub>. При этом суммарные количества всех газов, выделившихся из оливина в дунитах при режиме 1100°C, оказались выше, чем из оливина в гарцбургитах (табл. 7). Спектры распределения нормированных по хондриту Оханск 4Н содержаний газов в образцах оливинов из ультрамафитов Шаманского массива имеют примерно одинаковую дугообразно вогнутую к низу конфигурацию, которая свидетельствует о преобладании в них нормированных содержаний H<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O над нормированными содержаниями углеродсодержащих газов – CO<sub>2</sub>, CO и CH<sub>4</sub> (рис. 13). Предполагалось, что максимумы при температуре 350°C обусловлены выделением тех га-



**Рис. 13.** Спектры распределения нормированных по хондриту Оханск 4Н содержаний флюидных компонентов в оливинах из дунитов (обр. Ш-2/2 и Ш-26/1) и гарцбургита (обр. Ш-16/6) Шаманского массива (по данным табл. 7).

**Fig. 13.** The patterns of distribution normalized by chondrite Okhansk 4N fluid components contents in olivines from dunites (samples Ш-2/2, Ш-26/1), and harzburgite (sample Ш-16/6) from Shaman massif (data Table 7).

зов, которые накопились в составе микротрещин и микропор в зернах оливина при инфильтрации низкотемпературных эпигенетических флюидов. В свою очередь, максимумы при температуре 650°C, по-видимому, обусловлены выделением газовых компонентов при термической деструкции выделений серпентина, частично заместившего зерна оливина. Наконец, максимумы при температуре 1100°C, вероятно, обусловлены выделением тех газов, которые могли быть законсервированы в составе газовой-жидких микровключений непосредственно в процессе роста кристаллов оливина в эндогенных условиях. Можно допустить, что в первом приближении компонентный состав газов, выделившихся при температуре 1100°C, сопоставим с составом того флюида, который находился в равновесии с оливином при его кристаллизации в условиях верхней мантии. Добавим, что оценки степени насыщенности породообразующих оливинов флюидными компонентами можно использовать в качестве одного из критериев степени дефектности их кристаллов [17].

## ВЫВОДЫ

1. Шаманский массив, сложенный гарцбургитами при подчиненной роли дунитов, представляет собой крупный тектонический блок (протрузию) реститогенных ультрамафитов, входящий в состав Байкало-Муйского офиолитового пояса. В массиве отчетливо проявляется динамометаморфическая зональность, которая выражается в том, что в его центральной части преобладают гарцбургиты и дуниты с протогранулярной и мезогранулярной микроструктурами оливинов, сформированных при высокотемпературных пластических деформациях в условиях верхней мантии. По периферии массива интенсивность пластических деформаций оливина в ультрамафитах возрастает, что проявляется в переходах к порфирокластовой, порфиroleйстовой и мозаичной микроструктурам оливинов, образованных при перемещении протрузии ультрамафитов с уровней верхней мантии на разные уровни земной коры в условиях понижения температуры и повышения скорости процесса их пластической деформации.

2. Дуниты и гарцбургиты массива в разной мере серпентинизированы и заметно истощены такими компонентами, как  $TiO_2$ ,  $Na_2O$  и  $K_2O$ . По содержанию  $MgO$  и  $CaO$  эти породы сравнимы с аналогичными породами из комплекса Изу-Бонин, но отличаются от них несколько повышенными содержаниями  $Al_2O_3$ .

3. Ультрамафиты массива характеризуются повышенными содержаниями  $Zr$  и  $Hf$ , между которыми наблюдается прямая зависимость. Это позволило предположить, что оба эти элемента сосредоточены, главным образом, в структуре акцессорного циркона, редкие зерна которого бы-

ли обнаружены в искусственных шлихах пород массива.

4. Породы массива истощены редкоземельными элементами, при этом их суммарные содержания в гарцбургитах несколько выше, чем в дунитах. Спектры распределения хондрит-нормированных содержаний РЗЭ в гарцбургитах и дунитах имеют дугообразно изогнутую книзу конфигурацию, что обусловлено их аномальным обогащением легкими РЗЭ. Предполагается, что существенная часть определяемых в ультрамафитах легких РЗЭ сосредоточена в межзерновых и внутризерновых микротрещинах в виде неструктурной примеси.

5. Содержание ЭПГ в пробах гарцбургитов и дунитов определялось методом ICP-MS после кислотного разложения навесок их проб двумя способами: в автоклаве MARS-5 и в трубке Кариуса. При разложении проб первым способом суммарные содержания ЭПГ оказались более низкими, чем при разложении проб вторым способом. В ультрамафитах массива выявлена обратная зависимость между содержаниями  $Ru$  и содержаниями тяжелых РЗЭ ( $Er$ ,  $Tm$ ,  $Yb$ ,  $Lu$ ), а также между суммарными содержаниями ЭПГ и РЗЭ. Предполагается, что это обусловлено разнонаправленным фракционированием этих контрастных по своим свойствам групп элементов в процессе частичного плавления верхне-мантийного протолита. В проанализированных образцах ультрамафитов содержания  $Ru$  превышали содержания  $Os$  и  $Ir$ , что позволило предположить, что эти элементы сосредоточены, главным образом, в микрочастицах таких обогащенных рутением минералов, как рутеносмирид и лаурит.

6. Оливины из ультрамафитов массива характеризуются очень низкими содержаниями РЗЭ и неравномерным их распределением. Предполагается, что пластические деформации и перекристаллизация кристаллов оливина, происходившие на разных глубинах и при разных температурных режимах, сопровождались центробежной диффузией ионов РЗЭ из кристаллов минерала в межзерновые и внутризерновые микротрещины. При нагреве проб оливинов при температурных режимах в 650°C и 1100°C из них преимущественно выделялись окисленные газы ( $H_2O$ ,  $CO_2$ ) и в значительно меньших количествах – восстановленные газы ( $CO$ ,  $CH_4$ ,  $H_2$ ). Допускается, что составы газов, которые выделялись из оливинов при температурном режиме 1100°C, в первом приближении могут характеризовать состав того флюида, который находился в равновесии с оливином при его кристаллизации в условиях верхней мантии.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анашкина К.К., Бутин К.С., Еникеев Ф.И. (1997) Геологическое строение Читинской области. Объяснительная записка к геологической карте масштаба 1 : 500 000. Чита: "Читагеолъемка", 239 с.

2. Вахрушева Н.В., Алимов В.Ю. (2005) О локальной изменчивости спектров редкоземельных элементов в хромитоносных ультрамафитах Полярного Урала. *Литосфера*. (1), 41-57.
3. Глебовицкий В.А., Никитина Л.П., Вревский А.Б., Пушкарев Ю.Д., Бабушкина М.С., Гончаров А.Г. (2009) Природа химической неоднородности континентальной литосферной мантии *Геохимия*. (9), 910-936.
4. Гончаренко А.И. (1989) Деформация и петроструктурная эволюция альпинотипных гипербазитов Томск: Изд. ТГУ, 400 с.
5. Грудинин М.И. (1979) Базит-гипербазитовый магматизм Байкальской горной области. Новосибирск: Наука, 156 с.
6. Зеленский Е.Е. (1978) Объяснительная записка к Геологической карте СССР масштаба 1 : 200 000. Серия Бодайбинская. Лист О-50-XXXII. (ред. А.А. Мальшев). М.: Недра, 44 с.
7. Кибанов Г.А. (1968) Новые данные о структуре Муйского базит-гипербазитового пояса // Вопросы геологии Прибайкалья и Забайкалья. Вып. 3(5). Чита: Изд. Забайкальского филиала Географического общества СССР, 95-97.
8. Кибанов Г.А. (1971) Объяснительная записка к Геологической карте СССР масштаба 1 : 200 000. Серия Прибайкальская. Лист N-50-II. (ред. В.Л. Тихонов). М.: Недра, 145 с.
9. Коваленко В.И., Рябчиков И.Д., Штош Х.Г. (1989) Геохимия редкоземельных элементов в шпинелевых лерцолитах нодулей: модель примитивной мантии. *Геохимия*. (6), 771-784.
10. Козьменко О.А., Палесский С.В., Николаева И.В., Томас В.Г., Аношин Г.Н. (2011) Усовершенствование методики химической подготовки геологических образцов в трубках Кариуса для определения элементов платиновой группы и рения. *Аналитика и контроль*. 15(4), 378-385.
11. Леснов Ф.П. (2007) Редкоземельные элементы в ультрамафитовых и мафитовых породах и их минералах. Книга 1. Главные типы пород. Породообразующие минералы. Новосибирск: "Гео", 403 с.
12. Леснов Ф.П. (2009) Редкоземельные элементы в ультрамафитовых и мафитовых породах и их минералах. Книга 2. Второстепенные и акцессорные минералы. Новосибирск: "Гео", 109 с.
13. Леснов Ф.П. (2015) Петрология полигенных мафит-ультрамафитовых массивов Восточно-Сахалинской офиолитовой ассоциации. Новосибирск: "Гео". 240 с.
14. Леснов Ф.П., Аношин Г.Н. (2011) Соотношение рения и элементов платиновой группы в породах, рудах и минералах мафит-ультрамафитовых ассоциаций. *Докл. АН*. 437(2). 228-234.
15. Леснов Ф.П., Козьменко О.А., Томиленко А.А., Дребущак В.А., Фомина Л.Н. (2009) О фазовом составе обогащенного легкими редкоземельными элементами тонкодисперсного микротрещинного вещества в шпинелевом лерцолите из ксенолита в щелочных базальтах палеовулкана Шаварын Царам (Монголия). *Металлогения древних и современных океанов-2009. Модели рудообразования и оценки месторождений*. Миасс: ИМин УрО РАН, 270-273.
16. Леснов Ф.П., Ломоносова Е.И., Гончаренко А.И., Шипицын Ю.Г., Пугачева Е.Е. (1995) Распределение редкоземельных элементов в оливинах офиолитовых ассоциаций. *Геология и геофизика*. 36(2), 50-60.
17. Леснов Ф.П., Осоргин Н.Ю., Ковязин С.В. (1994) Содержание газовых компонентов во включениях пороодообразующих оливинов как показатель дефектности их структуры. *Проблемы геологии Сибири*. 2. Томск: Томский госуниверситет, 9-10.
18. Леснов Ф.П., Чернышев А.И., Истомина В.Е. (2005) Геохимические свойства и типоморфизм оливинов из гетерогенных ультрамафитовых пород. *Геохимия*. (4). 395-414.
19. Леснов Ф.П., Чернышов А.И., Козьменко О.А., Николаева И.В., Палесский С.В. (2012) О соотношениях элементов платиновой группы и редкоземельных элементов в ультрамафитовых рестилах из Шаманского массива (Восточное Забайкалье): первые данные. *Ультрабазит-базитовые комплексы складчатых областей и их минерогения. IV международная конференция*. Улан-Удэ: ГИ СО РАН, 94-97.
20. Лоскутов И.Ю., Асосков В.М. (2010) Оценка потенциальной хромитоносности Шаманского гипербазитового массива. *Руды и металлы*. (6), 32-36.
21. Орсов Д.А., Мехоношин А.С., Бадмацыренова Р.А. (2011) Перспективы Северо-Байкальской никеленосной провинции на платиноиды. *Платина России*. Вып. VII. Красноярск: КНИИГиМС, 275-279.
22. Прудовский Э.Л., Грудинин М.И. (1971) Особенности геологического строения и вещественного состава дунит-троктолитового массива Маринкин (Средне-Витимская горная страна). *Геологические формации Прибайкалья и Забайкалья. Труды Забайкальского филиала Географического общества СССР*. Вып. XXV, 21-24.
23. Пугачева Е.Е. (1988) Внутренняя деформационная структура Шаманского гипербазитового массива. *Актуальные вопросы геологии Сибири*. Томск: Томский госуниверситет, 122-123.
24. Пугачева Е.Е. (1996) Петрология гипербазитов Шаманского массива (Средневитимская горная страна). Дисс.... канд. геол.-мин. наук. Томск: Томский госуниверситет, 334 с.
25. Рингвуд А.Е. (1981) Состав и петрология мантии Земли. М.: Недра, 584 с.
26. Симонов В.А., Лутц Б.Г. (1992) Термобарогеохимические исследования офиолитов Троодоса (Кипр). *Термобарогеохимия минералообразующих процессов*. Вып. 2. Новосибирск: ОИГТМ СО РАН, 55-76.
27. Цыганков А.А. (2005) Магматическая эволюция Байкало-Муйского вулканоплутонического пояса в позднем докембрии. Новосибирск: СО РАН, 306 с.
28. Чернышов А.И. (1999) Петроструктурный анализ и петрология ультрамафитов различных формационных типов. Дисс.... докт. геол.-мин. наук. Новосибирск: Институт геологии и минералогии СО РАН, 420 с.
29. Шагжиев К.Ш. (1972) Геология и петрография Парамского и Шаманского массивов (Средне-Витимская горная страна). Дисс... канд. геол.-мин. наук. Томск: Томский госуниверситет, 290 с.
30. Anders E., Gravenese N. (1989) Abundances of the elements: meteoritic and sola. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 53, 197-214.

31. McDonough W.F., Sun S.-S. (1995) The composition of the Earth. *Chemical Geology*. **120**. 223-253.
32. Parkinson I. J., Pearce J.A. (1998) Peridotites from the Izu-Bonin-Mariana Forearc (ODP Leg 125): Evidence for Mantle Melting and Melt-Mantle Interaction in a Supra-Subduction Zone Setting. *J. Petrol.* **39**(9), 1577-1618.

## Geochemistry of rare, rare earth elements and platinum group elements in rocks of Shaman ultramafic massif (Eastern Transbaikalia)

F.P Lesnov\*, A.I. Chernyshov\*\*, E.E Pugacheva\*\*\*

\*Institute of geology and mineralogy, Siberian Branch of RAS

\*\*Tomsk State University

\*\*\*Tomsk Polytechnic University

The research on petrochemistry and geochemistry of rare, rare earth and platinum group elements in the rocks Shaman massif – the largest ultramafic protrusion body in eastern branch of the Baikal-Muya ophiolite belt, performed using a different of analytical techniques (X-ray fluorescence analysis, mass spectrometry analysis with inductively coupled plasma and laser ablation; synchrotron radiation method). Harzburgites and subordinate dunites, composing massif, depleted TiO<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O and CaO, and rare earth elements (REE). The total content of the latter in harzburgites somewhat higher (0.29–3.01 ppm) than in dunites (0.12–1.54 ppm). The patterns of chondrite-normalized REE contents in ultramafic rocks are arched downward configuration, due to their abnormal enrichment nonstructural admixture of light elements, centered as it is assumed in the intergranular and within granular microcracks. Massif is characterized by higher contents of Zr and Hf, the hub of which is supposed to be an accessory zircon. The total content of platinum group elements (PGE) in the harzburgite and dunite are from 12.50 to 24.35 ppb, while the predominant element is Ru. There was an inverse relationship between its content and the content of heavy rare earth elements (Er, Tm, Yb, Lu), and between the total content of PGE and REE, which are supposed to be due to divers directional fractionation of these groups of elements with contrasting properties in the process of partial melting of upper mantle protolithe. Prevalence of Ru in the rocks suggested that PGE concentrated mainly in the such minerals as rutenosmirid and laurite.

Key words: *restites, harzburgite, dunite, geochemistry, rare and rare earth elements, platinum group elements, Shaman massif, Baykal-Muya mafic-ultramafic belt, Eastern Transbaikalia.*

### REFERENCES

- Anashkina K.K., Butin K.S., Enikeev F.I. (1997) *Geologicheskoe stroenie Chitinskoj oblasti. Ob'jasnitel'naja zapiska k geologicheskoy karte masshtaba 1 : 500 000* [Geological structure of the Chita region. Explanatory note to the geological map of scale 1 : 500 000]. Chita: Citageols'emka Publ., 39 p. (In Russian)
- Vakhrusheva N.V., Alimov V.Y. (2005) On the local variability of the spectra of rare-earth elements in the chromite-bearing ultramafic rocks of the Polar Urals. *Lithosphere*. (1), 41-57. (In Russian)
- Glebovitsky V.A., Nikitina L.P., Vrevsky A.B., Pushkarev Y.D., Babushkina M.S., Goncharov A.G. (2009) The nature of the chemical heterogeneity of the continental lithospheric mantle. *Geokhimiya*. (9), 910-936. (In Russian)
- Goncharenko A.I. (1989) *Deformatsiya i petrostruktural'naja evolyutsiya al'pinotipnykh giperbazitov* [Deformation and petrostructural evolution of Alpine ultramafites] Tomsk Univ. Publ., 400 p. (In Russian)
- Grudin M.I. (1979) *Bazit-giperbazitovyj magmatizm Bajkal'skoj gornoj oblasti* [Mafic-ultramafic magmatism Baikal mountain area]. Moscow: Nauka Publ., 156 p. (In Russian)
- Zelensky E.E. (1978) *Ob'jasnitel'naja zapiska k Geologicheskoy karte SSSR masshtaba 1 : 200 000. Seriya Bodajbinskaja. List O-50-XXXII*. (Ed. A.A. Malyshev) [Explanatory note to USSR Geological map scale of 1 : 200 000. A series Bodaibo. Sheet O-50-XXXII] (Ed. A.A. Malyshev). Moscow: Nedra Publ., 44 p. (In Russian)
- Kibanov G.A. (1968) New data on the structure of Muya mafic-ultramafic belt. *Geology Baikal and Trans-Baikal*. Vol. 3 (5). Chita: Trans-Baikal branch of the Geographical Society of the USSR Publ., 95-97. (In Russian)
- Kibanov G.A. (1971) *Ob'jasnitel'naja zapiska k Geologicheskoy karte SSSR masshtaba 1 : 200 000. Seriya Pribajkal'skaja. List N-50-II*. (Ed. V.L. Tikhonov) [Explanatory notes to geological map of the USSR, scale 1 : 200 000. A series Pribaikalskaya. Sheet N-50-II] (Ed. V.L. Tikhonov). Moscow: Nedra Publ., 145 p. (In Russian)
- Kovalenko V.I., Rjabchikov I.D., Shtosh H.G. (1989) Geochemistry of rare earth elements in spinel lherzolites nodules: a model of the primitive mantle. *Geokhimiya*. (6), 771-784. (In Russian)
- Kozmenko O.A., Palessky S.V., Nikolaeva I.V., Thomas V.G. Anoshin G.N. (2011) Improvement of methods

- of chemical preparation of geological samples in tubes Carius for determination of platinum group elements, and rhenium. *Analysis and control*. **15**(4), 378-385. (In Russian)
11. Lesnov F.P. (2007) *Redkozemel'nye elementy v ul'tramafitovykh i mafitovykh porodakh i ikh mineralakh. Kniga 1. Glavnye tipy porod. Porodoobrazuyushchie mineraly* [Rare earth elements in ultramafic and mafic rocks and minerals. Book 1. The main rock types. Rock-forming minerals]. Novosibirsk: Geo Publ., 403 p. (In Russian)
  12. Lesnov F.P. (2009) *Redkozemel'nye elementy v ul'tramafitovykh i mafitovykh porodakh i ikh mineralakh. Kniga 2. Vtorostepennye i aktsessornye mineraly* [Rare earth elements in ultramafic and mafic rocks and minerals. Book 2. Minor and accessory minerals]. Novosibirsk: Geo Publ., 109 p. (In Russian)
  13. Lesnov F.P. (2015) *Petrologija poligennykh mafit-ul'tramafitovykh massivov Vostochno-Sahalinskoj ofiolitovoj assotsiatsii* [Petrology polygenic mafic-ultramafic massifs of the East Sakhalin ophiolite association]. Novosibirsk: Geo Publ., 240 p. (In Russian)
  14. Lesnov F.P., Anoshin G.N. (2011) The ratio of rhenium and platinum group elements in the rocks, ores and minerals mafic-ultramafic association. *Dokl. Akad. Nauk*. **437**(2), 228-234. (In Russian)
  15. Lesnov F.P., Kozmenko O.A., Tomilenko A.A., Drebushchak V.A., Fomina L.N. (2009) On the phase composition of enriched LREE fine microcracks matter in spinel lherzolite from xenoliths in alkaline basalts paleovolcano Shavaryn Tsaram (Mongolia). *Metallogeny of ancient and modern oceans-2009. Models of mineralization and evaluation fields*. Miass: Institute of Mineralogy Urals Branch of RAS Publ., 270-273. (In Russian)
  16. Lesnov F.P., Lomonosova E.I., Goncharenko A.I., Shipitsyn Y.G., Pugacheva E.E. (1995) The distribution of rare earth elements in olivine ophiolite associations. *Geol. Geofiz.* **36**(2), 50-60. (In Russian)
  17. Lesnov F.P., Osorgin N.Y., Kovyazin S.V. (1994) The content of the gas components of olivine rock forming in the inclusions as an indicator of defects in their structure. *Problems of geology of Siberia. 2*. Tomsk: Tomsk State University Publ., 9-10. (In Russian)
  18. Lesnov F.P., Chernyshev A.I., Istomin V.E. (2005) Geochemical properties and typomorphism olivine from heterogeneous ultramafic rocks. *Geokhimiya*. (4), 395-414. (In Russian)
  19. Lesnov F.P., Chernyshov A.I., Kozmenko O.A., Nikolaeva I.V., Palessky S.V. (2012) On the relations of platinum group elements and rare earth elements in ultramafic restites of Shaman massif (Eastern Transbaikalia): the first data. *Mafic-ultramafic complexes of folded regions and their minerageny. IV International Conference*. Ulan-Ude: Geological Institute Siberian Branch of RAS Publ., 94-97. (In Russian)
  20. Loskutov I.Y., Asoskov V.M. (2010) Evaluation of potential Shaman chromite-bearing ultramafic massif. *Ores and metals*. (6), 32-36. (In Russian)
  21. Orsoev D.A., Mekhonoshin A.S., Badmantsyrenova R.A. (2011) Prospects for the North-Baikal nickeliferous province on platinum group metals. *Platinum Russia. Vol. VII*. Krasnoyarsk: KNIIGiMS Publ., 275-279. (In Russian)
  22. Prudovsky E.L., Grudinin M.I. (1971) Features of geological structure and material composition of dunite-troktolite Marinkin massif (Mid-Vitim Highland). *The geological formations of the Baikal region and Transbaikalia. Proceedings of the Trans-Baikal branch of the Geographical Society of the USSR*. Vol. XXV, 21-24. (In Russian)
  23. Pugacheva E.E. (1988) Internal deformation structure Shaman ultramafic massif. *Topical issues of Siberia geology. Tomsk: Tomsk State University Publ.*, 122-123. (In Russian)
  24. Pugacheva E.E. (1996) *Petrologija giperbazitov Shamanskogo massiva (Srednevitimskaja gornaja strana)*. Petrology of ultramafic massif Shaman (Mid-Vitim Highland). Diss. ... kand. geol.-min. sci. Tomsk: Tomsk State University, 334 p. (In Russian)
  25. Ringwood A.E. (1975) *Composition and Petrology of the Earth 's Mantle*. McGraw-Hill, NY 618 p. (Russ. ed., Ringvud A.E. (1981) *Sostav i petrologija mantii Zemli*. Moscow: Nedra Publ., 584 p.)
  26. Simonov V.A., Lutz B.G. (1992) Thermobarogeochemical study ophiolite Troodos (Cyprus). *Thermobarogeochemistry mineralizing processes. Vol. 2*. Novosibirsk: Siberian Branch of RAS Publ., 55-76. (In Russian)
  27. Tsygankov A.A. (2005) *Magmaticheskaja evolyutsija Bajkalo-Mujskogo vulkano-plutonicheskogo pojasa v pozdnem dokembrii* [The magmatic evolution of the Baikal-Muya volcanoplutonic belt in the Late Precambrian]. Novosibirsk: Russian Academy of Sciences Publ., 306 p. (In Russian)
  28. Chernyshov A.I. (1999) *Petrostrukturnyj analiz i petrologija ul'tramafitov razlichnykh formatsionnykh tipov*. Diss. ... dokt. geol.-min. sci [Petrostructural analysis and Petrology of ultramafic rocks of different formation types. Dr. geol.-min. sci diss]. Novosibirsk Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, 420 p. (In Russian)
  29. Shagzhiev K.S. (1972) *Geologija i petrografija Paramnskogo i Shamanskogo massivov* (Mid-Vitim Highland) [Geology and petrography Paramskiy and Sham massifs (Mid-Vitim highland)]. Diss. ... kand. geol.-min. sci. Tomsk: Tomsk State University, 290 p. (In Russian)
  30. Anders E., Gravelle N. (1989) Abundances of the elements: meteoritic and solar *Geochim. Cosmochim. Acta*. **53**, 197-214.
  31. McDonough W.F., Sun S.-S. (1995) The composition of the Earth. *Chemical Geology*. **120**. 223-253.
  32. Parkinson I.J., Pearce J.A. (1998) Peridotites from the Izu-Bonin-Mariana Forearc (ODP Leg 125): Evidence for Mantle Melting and Melt-Mantle Interaction in a Supra-Subduction Zone Setting. *J. Petrol.* **39**(9), 1577-1618.