

Петрографические и петрогеохимические особенности гарцбургитов и дунитов Агардагского и Улорского массивов (Юго-Восточная Тыва)*

А. А. Пешков, А. И. Чернышов

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Российская Федерация, 634050, Томск, пр. Ленина, 36

Для цитирования: Пешков, А. А., Чернышов, А. И. (2021). Петрографические и петрогеохимические особенности гарцбургитов и дунитов Агардагского и Улорского массивов (Юго-Восточная Тыва). *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 66 (2), 331–348. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.208>

Объектом исследования являются Агардагский и Улорский ультрамафитовые массивы, входящие в состав Южно-Тувинского офиолитового пояса. Цель работы заключается в исследовании петрографических, петрохимических и геохимических особенностей гарцбургитов и дунитов исследуемых массивов. В результате петрографического изучения были установлены основные типы пород, слагающие исследуемые массивы. В Агардагском массиве преобладают гарцбургиты, тогда как в Улорском массиве более распространены дуниты. В Улорском массиве дуниты и гарцбургиты часто пластически деформированы синтетектонической рекристаллизацией с образованием порфиро-кластовых структур. Химические составы оливина и хромшпинелидов в гарцбургитах и дунитах в обоих массивах являются сходными. Оливин по составу отвечает форстериту, при этом для ультрамафитов Улорского массива отмечаются большие вариации Fa (содержание фаялитового минала) и тенденция к уменьшению NiO . Хромшпинелиды в ультрамафитах Улорского массива имеют более широкие вариации составов и представлены хромитами, алюмохромитом, субферриалюмохромитом, в них полностью отсутствует V_2O_5 . По составу хромшпинелидов определена степень плавления ультрамафитов, которая оказалась близкой для обоих массивов и составляет ~40–50%. Отмечается более высокая хромистость ультрамафитов Агардагского массива, что, вероятно, обуславливает его повышенную потенциальную хромититонность. Ультрамафиты Агардагского и Улорского массивов являются интенсивно деплетированными образованиями, возникшими в похожих условиях, что влечет близость их породного и вещественного составов. Выявленные отличия обусловлены вариациями степени деплетирования и условиями их консолидации в земной коре, определяемые структурной позицией, а также метаморфизмом вмещающей рамы и внедрением более поздних интрузий.

Ключевые слова: офиолиты, ультрамафиты, петрография, гарцбургиты, дуниты, петрохимия, геохимия.

* Исследование выполнено в рамках гранта по постановлению Правительства РФ от 09.04.2010 № 220 по договору с Министерством образования и науки РФ от 20.02.2017 № 14.Y26.31.0012.

1. Введение

Агардагский и Улорский массивы являются наиболее крупными в составе Южно-Тувинского офиолитового пояса. Они структурно приурочены к Агардагской шовной зоне сочленения Сангиленского срединного сиалического массива с раннекаледонской Восточно-Таннуольской складчатой областью (рис. 1) (Гоникберг, 1999). Ультрамафитовые массивы в этой зоне неоднократно изучались другими исследователями (Котляров, 2010; Котляров и Симонов, 2018). Материа-

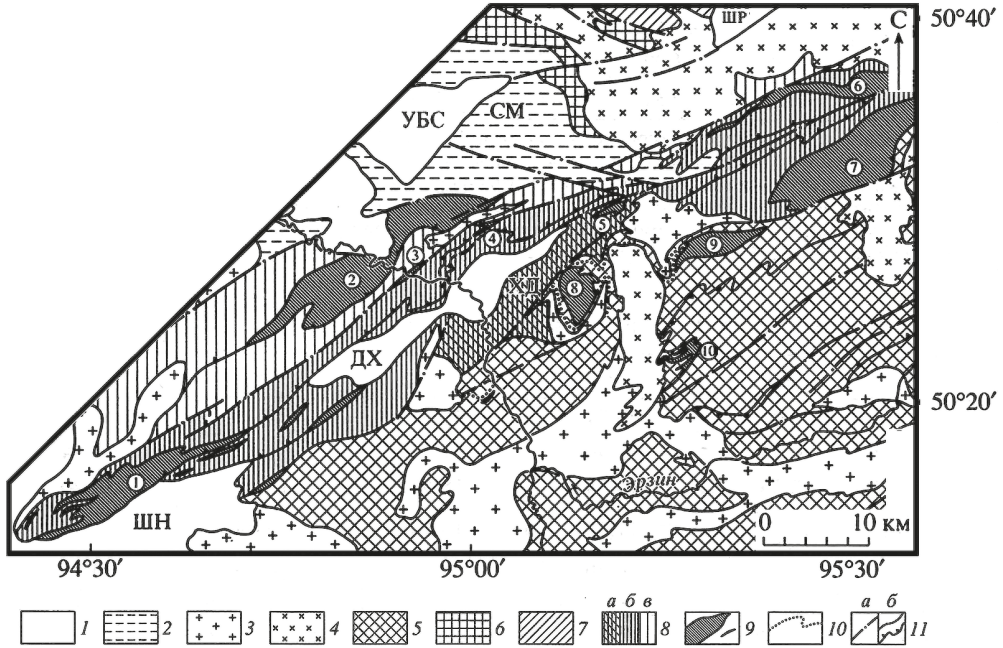


Рис. 1. Геотектоническая схема участка сочленения Сангиленского сиалического массива ранней консолидации с областью ранних каледонид Тувы, составленная по материалам (Гоникберг, 1999):

1 — кайнозойский чехол (впадины: УБС — Убсунурская, ШП — Шурмакская, ДХ — Дусхоль-Чонсаирская, ШН — Шаранурская); 2 — осадочные и средне-кислые вулканиты пост- и позднеорогенные (O₃-D), CM — Самагалтайская впадина; 3 — гранитоиды пост- и позднеорогенные калиевые и калинатровые (O-D); 4 — гранитоиды орогенные и раннеорогенные пестрого состава (Є₂-O). Основные геотектонические единицы раннекаледонского времени (в скобках — возраст стратифицированных комплексов): 5 — Сангиленский сиалический массив и его Верхнебуренский блок-спутник (R₃-Є₁); 6-8 — область ранних каледонид: 6 — Восточно-Таннуольский жесткий блок (R₃-Є₁), 7 — Балгазикская межблоковая зона (R₃-Є₁), 8 — Агардагская межблоковая зона (а — нижний меланократовый, R₃, б — средний кремнисто-базальтоидный, V-Є₁а, в — верхний туфогенно-карбонатный, Є₁л). 9 — массивы инициальных (додеформационных и/или дометаморфических) габброидов и гипербазитов (R₃, V-Є₁) вместе с ассоциирующими габбро-диоритами и плагиигранитами; 10 — амфиболитовые горизонты краевой части Сангиленского массива; 11 — разрывные нарушения (а — поздние, б — ранние субсогласные и кососекущие, включая древние пологие надвижки).

Цифры в кружках определяют массивы гипербазитов и метагабброидов: 1 — Агардагский, 2 — Карашатский, 3 — Тесхемский, 4 — Теректигсайские, 5 — Верхне-Чингеадырский, 6 — Кускунугско-Шурмакский, 7 — Улорский, 8 — Правотарлашкинский, 9 — Тарлашкинский, 10 — Солчерский.

ХД — Хиранигдагское габбро-амфиболитовое поле (выход позднерифейского меланократового основания Агардагской зоны)

лом для написания статьи послужили образцы ультрамафитов, которые отбирались авторами при проведении экспедиционных работ на исследуемых массивах в период с 1974 по 2019 г.

Агардагский массив находится в юго-западной части Южно-Тувинского офиолитового пояса. Он имеет линзовидную форму, протяженность около 23 км при ширине до 3.2 км и вытянут в северо-восточном направлении согласно с региональной структурой (Гончаренко, 1989). Контакты массива часто осложнены проникающими в него тектоническими клиньями кристаллических сланцев, а в зонах экзоконтакта нередко отмечаются отторженцы ультрамафитов. Вмещающие породы представлены кристаллическими сланцами с прослоями известняков, кремнистых, терригенных пород венд-кембрийского возраста (Никитчин, 1969). Массив сложен, главным образом, породами дунит-гарцбургитового полосчатого комплекса с преобладанием гарцбургитов. Дуниты наблюдаются среди гарцбургитов в виде полос, жил либо в виде неправильных по форме обособлений довольно заметных размеров от 0.3–0.5 до 200–300 м. Дуниты и гарцбургиты часто интенсивно серпентинизированы. Редко в массиве встречаются верлиты и клинопироксениты, обычно приуроченные к контактовым зонам ультрамафитов и габброидов. В Агардагском массиве выявлены многочисленные, небольшие по размерам тела хромититов (Никитчин, 1969).

Улорский массив расположен на северо-восточном фланге Агардагской шовной зоны. Его удлиненное в северо-восточном направлении линзовидное тело протяженностью 18.5 км обнажается на площади более 40 км². Массив вытягивается согласно структуре обрамления. Улорский массив в отличие от Агардагского залегает среди более древних протерозойских (мраморы, двуслюдяные сланцы, биотитовые гнейсы) и рифейских метаморфизованных вулканогенно-осадочных образований (Александровский и др., 2008). Вдоль северного эндоконтакта массива прослеживаются габброиды, с которыми ультрамафиты образуют единое тело. Улорский массив и породы его обрамления прорываются более молодыми гранитоидными интрузиями ордовикского возраста. В Улорском массиве преимущественным распространением пользуются дуниты и аподунитовые серпентиниты, реже гарцбургиты и развитые по ним серпентиниты. Дуниты и гарцбургиты нередко чередуются и образуют полосчатый комплекс. Верлиты и клинопироксениты встречаются в восточной части массива на контакте ультрамафитов и габброидов. Проявления хромититов в Улорском массиве пользуются меньшим распространением, чем в Агардагском. Они представлены зонами и гнездами вкрапленного и прожилково-вкрапленного оруденения, а также мелкими линзами и прожилками (Александровский и др., 2008).

2. Методы исследования

Петрографическое изучение ультрамафитов осуществлялось на современном поляризационном микроскопе AxioScop 40 фирмы Carl Zeiss. Определение петрогенных элементов в породах Агардагского массива проводилось с помощью рентгенофлуоресцентного анализа в Институте геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН (Иркутск). Данные о химическом составе ультрамафитов Улорского массива были заимствованы у И. Ю. Лоскутова (Лоскутов и др., 1999). Определение

концентраций редкоземельных элементов в ультрамафитах проводилось методом ICP-MS в ЦКП «Аналитическом центре геохимии природных систем» при Томском государственном университете (Томск). Составы минералов получены на рентгеноспектральном микроанализаторе с электронным зондом на электронном сканирующем микроскопе Tescan Vega II LMU, оборудованном энергодисперсионным спектрометром (с детектором Si (Li) Standard) INCA Energy 350 и волнодисперсионным спектрометром INCA Wave 700 в ЦКП «Аналитический центр геохимии природных систем» ТГУ (Томск).

3. Петрографическая характеристика пород

Гарцбургиты в обоих массивах представлены относительно свежими и серпентинизированными разностями, нередко переходящими в апогарцбургитовые серпентиниты (Пешков и Чернышов, 2019). Их структура среднезернистая, текстура однородная, реже директивная. Они сложены, главным образом, оливином (~70–85%), при подчиненной роли энстатита (~15–30%), в качестве акцессорного минерала отмечается хромшпинелид.

Оливин в гарцбургитах образует субизометричные, иногда вытянутые зерна с плавными и заливообразными границами. Их размер 3–6 мм, редко до 10 мм. Удлиненные зерна нередко обнаруживают предпочтительную ориентировку и отражают направление директивности. Для них характерно однородное погасание. Для пластически деформированных зерен оливина отмечается неоднородное погасание и полосы пластического излома.

Оливины в гарцбургитах Агардагского массива по химическому составу соответствуют форстериту ($Fa = 8.31–8.54\%$) (табл. 1), тогда как железистость оливина из гарцбургитов Улорского массива незначительно возрастает ($Fa = 8.95–9.27\%$). В оливинах Агардагского массива отмечаются тенденции к возрастанию SiO_2 и уменьшению MgO . Тогда как оливины Улорского массива отличаются повышенными содержаниями SiO_2 и меньшими содержаниями MgO . По своему составу оливины из гарцбургитов Агардагского и Улорского массивов являются практически аналогичными и близкими оливинам из гарцбургитов хромитоносного Эргакского массива ($Fa = 7.07–10.89\%$) (Рыбакова, 2019).

Энстатит установлен только в гарцбургитах Агардагского массива. Он наблюдается в виде субизометричных, ксеноморфных, нередко удлиненных индивидов, которые обнаруживают субпараллельную ориентировку, согласно директивности породы. Их размер от 3 до 6 мм. В пластически деформированных индивидах проявляется неоднородное погасание. Химический состав ортопироксена в гарцбургитах отличается высокой магнезиальностью при низкой железистости и глиноземистости (табл. 2). По своему составу ортопироксены соответствуют энстатиту малоглиноземистого типа (Малахов, 1983).

Энстатит в обоих массивах интенсивно замещается вторичными минералами. В гарцбургитах Агардагского массива он замещается псевдоморфозами бастита либо псевдоморфными агрегатами оливин-клинопироксен-тремолит-серпентин-магнетитового состава с различными вариациями минералов вплоть до мономинеральных. Тогда как в Улорском массиве в отличие от Агардагского энстатит чаще всего псевдоморфно замещен микрочешуйчатыми агрегатами талька.

Таблица 1. Химический состав оливина в ультрамафитах (в мас. %)

Образец	Порода	SiO ₂	MgO	FeO	NiO	Сумма	Fa (%)
Агардагский массив							
15010	Г	40.27	50.86	8.42	0.25	99.80	8.54
15020/1	Г	40.81	50.17	8.05	0.49	99.52	8.31
15025	Г	41.78	49.40	8.22	0.47	99.87	8.45
15011/4	Д	40.40	51.99	6.96	0.43	99.78	6.93
15018	Д	41.20	49.66	8.33	0.40	99.59	8.61
15027	Д	40.63	52.24	6.50	0.31	99.68	6.45
Улорский массив							
У-9	Г	42.37	47.76	9.61	0.29	100.03	8.95
У-15	Г	42.53	48.24	8.79	0.39	99.95	9.27
У-1	Д	43.08	48.88	7.77	0.31	100.04	8.19
У-11	Д	42.25	48.83	8.55	0.37	100.00	7.20
У-12/1	Д	42.92	49.83	6.89	0.36	100.00	5.71
У-14	Д	43.02	51.02	5.51	0.43	99.98	10.14

Примечание. Fa — содержание фаялитового минала [Fa (%) = Fe/(Fe + Mg) × 100]. Г — гарцбургит, Д — дунит. Аналитики — А. С. Кульков, Е. В. Корбовяк.

Таблица 2. Химический состав ортопироксена в гарцбургитах (в мас. %)

Образец	15010	15020/1	15020/3
SiO ₂	57.25	57.83	57.21
Al ₂ O ₃	0.74	1.01	0.99
Cr ₂ O ₃	0.47	0.59	0.36
FeO	4.94	5.68	5.57
MgO	35.68	34.05	34.48
CaO	0.92	0.83	1.39
Сумма	100	99.99	100
Числовые характеристики (в %)			
F	7.14	8.48	8.24
Wo	1.68	1.57	2.57
Fs	7.02	8.35	8.02
En	91.3	90.08	89.4

Примечание. F = Fe/(Fe + Mg) × 100, Wo = Ca/(Ca + Fe + Mg) × 100, Fs = Fe/(Ca + Fe + Mg) × 100, En = Mg/(Ca + Fe + Mg) × 100. Аналитик — А. С. Кульков.

Хромшпинелиды наблюдаются в виде редкой вкрапленности зерен, эвгедральной либо неправильной формы с размерами до 2 мм. В центральных частях зерна хромшпинелидов нередко просвечивают красно-вишневым цветом. Чаще они имеют черный цвет вследствие замещения магнетитом. Хромшпинелиды в гарцбургитах Агардагского массива отличаются однородностью химического состава и представлены, главным образом, хромитами и редко алюмохромитами и субферрихромитами, в которых иногда отмечаются заметные содержания V_2O_5 (табл. 3, рис. 2). Хромшпинелиды в гарцбургитах Улорского массива близки хромшпинелидам Эргакского массива и отличаются от Агардагского большей глиноземистостью. В первых двух массивах они представлены, главным образом, алюмохромитами при более широкой вариации составов в Эргакском массиве и полном отсутствии V_2O_5 .

Таблица 3. Химический состав хромшпинелида в ультрамафитах (в мас. %)

Образец	Порода	Al_2O_3	Cr_2O_3	V_2O_5	FeO	MgO	Сумма
Агардагский массив							
15010	Г	11.31	55.81	–	22.72	9.92	99.76
15011/2	Г	4.56	59.92	0.25	23.75	9.68	98.16
15012	Г	11.64	58.80	0.45	18.39	10.66	99.94
15020/1	Г	12.97	56.92	–	19.33	9.59	98.81
15024	Г	7.96	61.81	–	21.23	7.93	98.93
15011/3	Д	11.16	57.99	0.40	20.49	9.62	99.66
15011/4	Д	10.83	58.07	0.43	19.78	10.59	99.70
15018	Д	8.70	59.59	–	21.77	8.64	98.70
15025/2	Д	7.47	59.94	–	22.88	8.16	98.45
Улорский массив							
У-9	Г	13.44	54.51	–	22.06	9.44	99.45
У-15	Г	22.14	45.85	–	18.80	12.70	99.49
У-1	Д	9.76	58.48	–	21.93	9.55	99.72
У-11	Д	11.84	56.15	–	20.51	11.41	99.91
У-12/1	Д	10.30	58.42	–	20.14	10.87	99.73
У-14	Д	14.10	47.95	–	28.53	8.97	99.55

Примечание. Г — гарцбургиты, Д — дуниты. Аналитики — А. С. Кульков, Е. В. Корбовяк.

Дуниты также представлены как свежими, так и серпентинизированными разновидностями, вплоть до серпентинитов. Структура дунитов обычно средне-, крупнозернистая, иногда отмечается пегматоидная. При рекристаллизации образуется порфиорокластовая. Текстура обычно однородная, в участках порфиорокластеза отмечается наложенная директивность. Дуниты являются практически мономинеральными породами, содержание оливина составляет ~95–100 %, отмечаются акцессорные хромшпинелиды до 5 %.

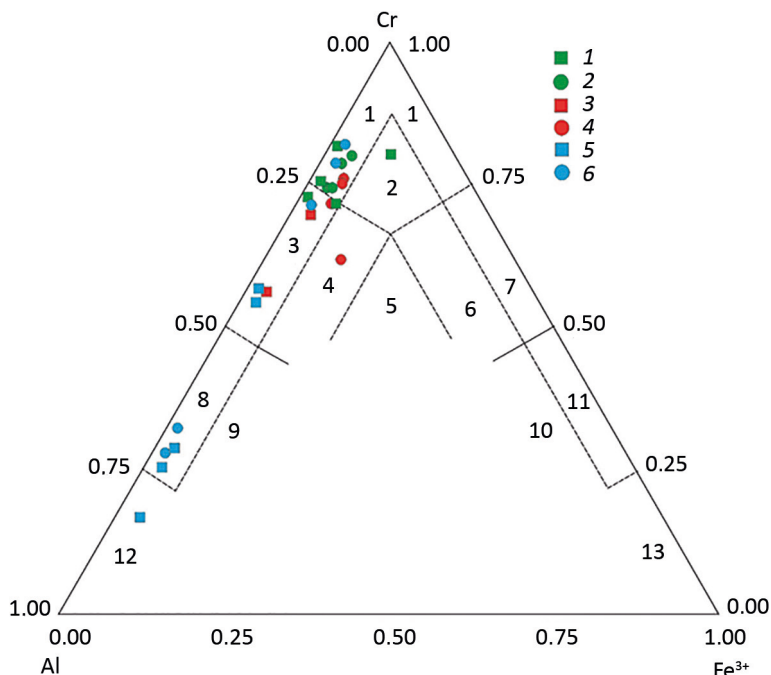


Рис. 2. Составы хромшпинелидов в ультрамафитах Агардагского и Улорского массивов на классификационной диаграмме Н.В.Павлова (1949):

1 — хромиты, 2 — субферрихромиты, 3 — алюмохромиты, 4 — субферриалюмохромиты, 5 — ферриалюмо-хромиты, 6 — субалюмоферрихромиты, 7 — феррихромиты, 8 — хромпикотиты, 9 — субферрихромпикотиты, 10 — субалюмохроммагнетиты, 11 — хроммагнетиты, 12 — пикотиты, 13 — магнетиты.

Агардагский массив: 1 — гарцбургиты, 2 — дуниты; Улорский массив: 3 — гарцбургиты; 4 — дуниты; Эргакский массив: 5 — гарцбургиты, 6 — дуниты

Оливин в дунитах обычно имеет неправильную либо субизометричную формы зерен с плавными, часто заливообразными границами. Для них характерны значительные вариации размером от 2 до 10 мм, иногда до 30 мм. Зерна оливина обычно имеют однородное погасание. В ультрамафитах Улорского массива в участках порфирокластеза наблюдаются интенсивные пластические деформации оливина с образованием порфирокластовых и гетерогранокластовых структур, при этом зерна оливина приобретают резко выраженное неоднородное волнистое погасание, появляются многочисленные полосы пластического излома. В участках порфирокластеза образуются удлиненные индивиды, которые ориентируются субпараллельно и отражают наложенную директивность. Вдоль границ деформированных индивидов оливина наблюдаются мозаичные агрегаты мелких зерен, которые образуются в результате синтетектонической рекристаллизации.

Оливины в дунитах Агардагского массива по своему составу соответствуют форстериту ($Fa = 6.45 - 8.61$) (табл. 1) и являются близкими оливинам из гарцбургитов, отмечается слабая тенденция к уменьшению железистости. Оливины дунитов Улорского массива тоже соответствуют форстериту, однако они отличаются более значительными вариациями железистости ($Fa = 5.71 - 10.14$) и тенденцией к умень-

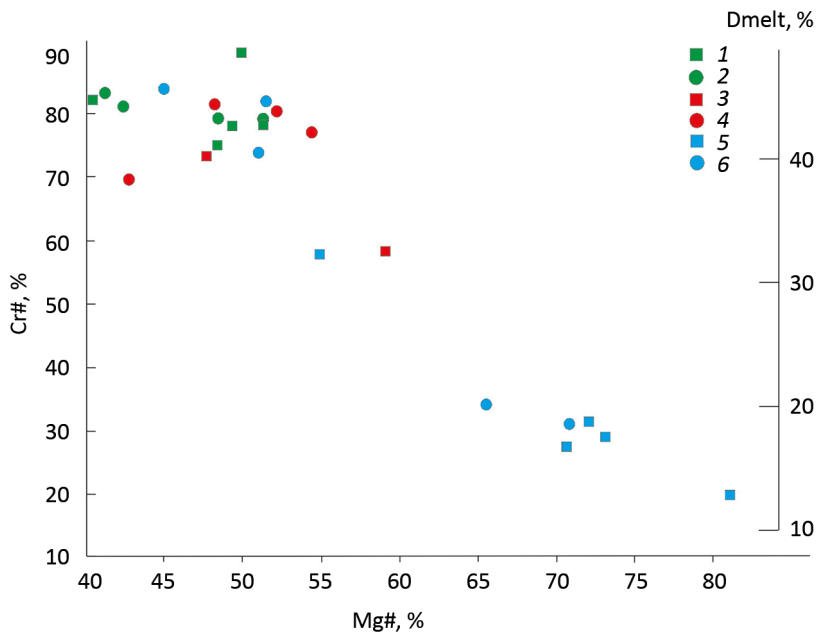


Рис. 3. Соотношение значений параметров $Cr = Cr/(Cr + Al) \%$ и $Mg = Mg/(Mg + Fe^{2+}) \%$, а также степени частичного плавления $D_{melt} \%$ ($D_{melt} = 0.426 Cr + 1.538$) в акцессорных хромшпинелидах из ультрамафитов:

Агардагский массив: 1 — гарцбургиты, 2 — дуниты; Улорский массив: 3 — гарцбургиты, 4 — дуниты; Эргакский массив: 5 — гарцбургиты, 6 — дуниты

шению содержания NiO по сравнению с дунитами Агардагского массива. В оливинах из дунитов обоих массивов отмечаются заметные содержания NiO в 0.31–0.43%. По своему составу оливины из дунитов Агардагского и Улорского массивов являются практически аналогичными и близкими оливинам из дунитов Эргакского массива ($Fa = 5.18\text{--}9.32 \%$) (Рыбакова, 2019).

Хромшпинелиды в дунитах наблюдаются в виде акцессорной вкрапленности зерен с размерами 0.5–1.5 мм. Они обычно имеют вишнево-красный, красно-бурый, а по трещинкам и периферии — черный цвет вследствие замещения магнетитом. Хромшпинелиды в дунитах Агардагского массива отличаются более однородным составом, чем хромшпинелиды из гарцбургитов, и представлены хромитами (табл. 3). Для хромшпинелидов в дунитах Улорского массива отмечаются более широкие вариации состава, сопоставимые с хромшпинелидами из гарцбургитов. Они представлены хромитами, алюмохромитом и субферриалюмохромитом. В них также полностью отсутствует V_2O_5 . Хромшпинелиды в дунитах Эргакского массива различаются по составу и могут относиться к одной из двух групп. В одних случаях они соответствуют алюмохромитам и аналогичны хромшпинелидам из гарцбургитов. Другая группа хромшпинелидов по составу соответствует хромшпинелидам из дунитов Агардагского и Улорского массивов и отличается от последних отсутствием V_2O_5 .

По составам хромшпинелидов, используя методику Ф.П. Леснова (Леснов и Подлипский, 2008), определена степень деплетирования ультрамафитов, которая оказалась очень близкой для Агардагского и Улорского массивов и составляет ~40–50% (рис. 3). Иногда в гарцбургитах степень деплетирования опускается до ~33%.

При этом для ультрамафитов Эргакского массива отмечаются значительные вариации степени деплетирования от 15 до 45 %. Отчетливо проявляется увеличение степени деплетирования от гарцбургитов к дунитам. Наименее деплетированные ультрамафиты (10–20 %), очевидно, характерны для слабо истощенных ультрамафитов и соответствуют лерцолитовому парагенезису (Рыбакова, 2020).

4. Петрохимические особенности ультрамафитов

Химический состав ультрамафитов был пересчитан и приведен к 100 мас. % (табл. 4). Анализ бинарных диаграмм позволил выявить как сходство, так и различия сравниваемых дунитов и гарцбургитов в исследованных массивах (рис. 4).

Наиболее информативными являются петрохимические диаграммы $\text{SiO}_2\text{-MgO}$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$. Для ультрамафитов исследуемых массивов отчетливо проявляется обратная корреляция между этими окислами. Для Агардагского массива поля фигуративных точек дунитов и гарцбургитов перекрываются и не обнаруживают каких-либо отличий. При этом наблюдаемый тренд распределения точек, очевидно, свидетельствует о неравномерной степени их деплетирования. Ультрамафиты Улорского массива обнаруживают сходство по распределению этих элементов с ультрамафитами Агардагского массива, однако для них отмечается отчетливая тенденция к уменьшению содержаний MgO . Для ультрамафитов Эргакского массива характерны наиболее широкие вариации MgO и повышенные содержания Al_2O_3 с отчетливой тенденцией увеличения MgO и уменьшения Al_2O_3 от гарцбургитов к дунитам. При этом отчетливо обособляются поля гарцбургитов и дунитов. Такое распределение, очевидно, свидетельствует о дискретной степени их деплетирования.

Для ультрамафитов Агардагского массива характерны большие вариации по содержанию Cr_2O_3 (табл. 4), тогда как содержания Cr_2O_3 в ультрамафитах Улорского массива являются близкими. Отмечается тенденция к уменьшению хромистости ультрамафитов Агардагского массива до минимальных, свойственных для ультрамафитов Улорского массива. Для ультрамафитов Агардагского массива характерны более высокие содержания NiO по сравнению с ультрамафитами Улорского массива (табл. 4). Содержания Cr_2O_3 и NiO в ультрамафитах Эргакского массива не определялись.

5. Геохимические особенности ультрамафитов

Анализ распределения редкоземельных элементов (РЗЭ) в гарцбургитах и дунитах обоих массивов показал, что они имеют близкие значения и несущественно отличаются (табл. 5, рис. 3). Можно отметить как некоторые отличительные особенности в породах исследуемых массивов, так и отличительные тенденции для сравниваемых массивов.

Дуниты и гарцбургиты Агардагского массива имеют близкие тренды распределения РЗЭ (рис. 5, а, в), которые характеризуются постепенным уменьшением содержаний легких элементов и частично средних до Eu . Далее средние и тяжелые элементы имеют примерно горизонтальное распределение с незначительными вариациями. Дуниты отличаются от гарцбургитов тенденцией уменьшения средних

Таблица 4. Химический состав ультрамафитов (в мас. %)

Образец	Порода	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	MnO	Na ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	NiO
15002	Г	42.17	0.01	0.36	8.26	0.28	47.73	0.13	0.03	0.01	0.77	0.24
15006	Г	43.45	0.02	0.40	8.19	0.89	46.23	0.13	0.07	0.01	0.37	0.24
15007/1	Г	44.41	0.01	0.44	7.97	0.51	45.79	0.14	0.08	0.01	0.39	0.25
15010	Г	44.27	0.01	0.47	9.24	0.44	44.44	0.14	0.11	0.02	0.62	0.24
15011/2	Г	44.27	0.01	0.39	8.12	0.31	45.91	0.16	0.12	0.01	0.46	0.23
15012	Г	43.46	0.01	0.41	8.48	0.17	46.40	0.15	0.07	0.01	0.61	0.24
15013/3	Г	44.71	0.01	0.63	6.74	0.14	46.52	0.08	0.14	0.01	0.75	0.26
15013/8	Г	44.05	0.01	0.15	9.44	0.02	45.51	0.14	0.09	0.01	0.32	0.25
15024	Г	42.96	0.04	0.47	8.32	0.18	46.79	0.13	0.12	0.02	0.71	0.26
15011/3	Д	43.34	0.02	0.55	9.35	0.19	45.20	0.15	0.19	0.03	0.72	0.26
15017/1	Д	43.07	0.01	0.51	8.88	0.73	45.73	0.10	0.08	0.01	0.63	0.25
15017/2	Д	42.83	0.01	0.48	8.35	0.02	47.23	0.16	0.02	0.01	0.63	0.27
15018	Д	42.33	0.02	0.24	8.34	0.16	48.16	0.15	0.08	0.02	0.24	0.26
15019	Д	42.96	0.02	0.24	8.50	0.13	47.21	0.13	0.07	0.02	0.48	0.24
15021	Д	44.80	0.04	0.50	8.76	0.28	44.52	0.13	0.07	0.01	0.64	0.25
15025/2	Д	42.21	0.03	0.14	8.63	0.22	48.16	0.15	0.08	0.01	0.11	0.26

Улорский массив													
С-21А-89	Г	44.55	0.03	0.66	8.35	0.12	44.94	0.39	0.32	0.02	0.38	0.24	
С-20А-89	Г	44.28	0.03	0.76	9.17	0.15	43.77	0.91	0.32	0.07	0.33	0.21	
С-20Г/2-89	Г	43.97	0.03	0.61	9.37	0.13	44.71	0.28	0.33	0.01	0.33	0.23	
С-20Б-89	Д	43.86	0.03	0.87	9.28	0.15	43.86	1.02	0.32	0.05	0.34	0.22	
С-21Б-89	Д	44.62	0.03	0.42	10.14	0.15	43.06	0.69	0.32	0.01	0.33	0.23	
С-17-89	Д	42.59	0.05	0.74	9.82	0.14	45.14	0.57	0.34	0.02	0.38	0.22	
С-20В-89	Д	44.59	0.04	0.68	8.88	0.13	44.58	0.11	0.36	0.04	0.37	0.24	
С-59-3-89	Д	41.22	0.04	0.21	8.64	0.16	48.77	0.10	0.36	0.01	0.23	0.27	

Примечание. Г — гарцбургиты; Д — дуниты. Аналитик — Т. В. Ожигина.

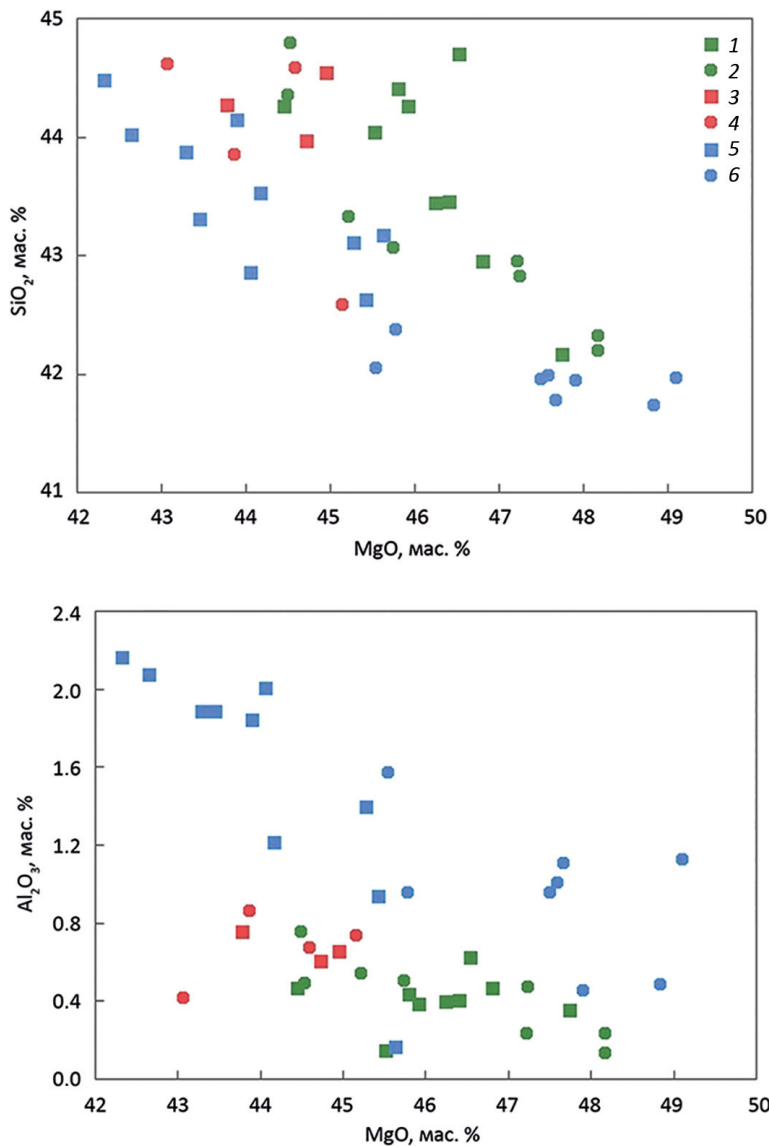


Рис. 4. Бинарные диаграммы для ультрамафитов исследуемых массивов:

Агардагский массив: 1 — гарцбургиты, 2 — дуниты; Улорский массив: 3 — гарцбургиты, 4 — дуниты; Эргакский массив: 5 — гарцбургиты, 6 — дуниты

и тяжелых элементов при примерно равных концентрациях легких. Такие отличия, вероятно, являются следствием увеличения степени деплетирования от гарцбургитов к дунитам.

РЗЭ в ультрамафитах Улорского массива имеют близкий характер распределения с ультрамафитами Агардагского массива (рис. 5, б, г). Гарцбургиты Улорского массива по составу РЗЭ отличаются по наиболее выраженному отрицательному Eu-минимуму. Иногда проявляется Eu-максимум, который сопровождается увели-

Таблица 5. Содержания редкоземельных элементов в ультрамафитах, нормированные по (Boynston, 1984) (г/г)

№ обр.	15006	15007/1	15010	15012	15011/4	15019	15021	15027	У-9/1	У-9/2	У-18	У-1	У-11	У-12/1	У-15	
	Агардагский массив								Улорский массив							
Порода	Гарцбургит				Дунит				Гарцбургит				Дунит			
	La	0.606	0.347	0.381	0.443	0.486	0.253	0.226	0.371	0.841	0.430	0.234	0.279	0.440	0.299	0.297
Ce	0.459	0.296	0.292	0.395	0.371	0.180	0.166	0.257	0.535	0.347	0.180	0.235	0.324	0.225	0.223	
Pr	0.356	0.259	0.193	0.387	0.256	0.158	0.125	0.200	0.421	0.211	0.082	0.121	0.184	0.107	0.125	
Nd	0.283	0.230	0.156	0.349	0.194	0.091	0.131	0.160	0.360	0.210	0.070	0.098	0.135	0.119	0.089	
Sm	0.183	0.191	0.126	0.301	0.121	0.067	0.084	0.102	0.151	0.084	0.044	0.059	0.079	0.031	0.040	
Eu	0.111	0.133	0.066	0.153	0.070	0.051	0.050	0.050	0.048	0.029	0.075	0.053	0.084	0.066	0.068	
Gd	0.133	0.160	0.082	0.185	0.086	0.050	0.040	0.070	0.112	0.060	0.036	0.043	0.050	0.028	0.032	
Tb	0.094	0.131	0.079	0.167	0.052	0.043	0.047	0.058	0.075	0.056	0.043	0.028	0.054	0.038	0.032	
Dy	0.091	0.138	0.084	0.134	0.058	0.043	0.044	0.051	0.087	0.041	0.035	0.034	0.055	0.028	0.028	
Ho	0.075	0.127	0.084	0.119	0.050	0.044	0.037	0.048	0.078	0.044	0.044	0.022	0.045	0.042	0.028	
Er	0.079	0.141	0.073	0.136	0.065	0.030	0.030	0.045	0.078	0.037	0.036	0.018	0.034	0.036	0.027	
Tm	0.056	0.113	0.088	0.135	0.037	0.037	0.057	0.033	0.092	0.039	0.063	0.015	0.033	0.044	0.025	
Yb	0.097	0.148	0.109	0.136	0.036	0.046	0.068	0.039	0.092	0.037	0.053	0.022	0.033	0.037	0.021	
Lu	0.063	0.119	0.115	0.116	0.047	0.056	0.065	0.041	0.091	0.044	0.094	0.020	0.036	0.040	0.018	

Примечание. Аналитик — Е. С. Рабцевич.

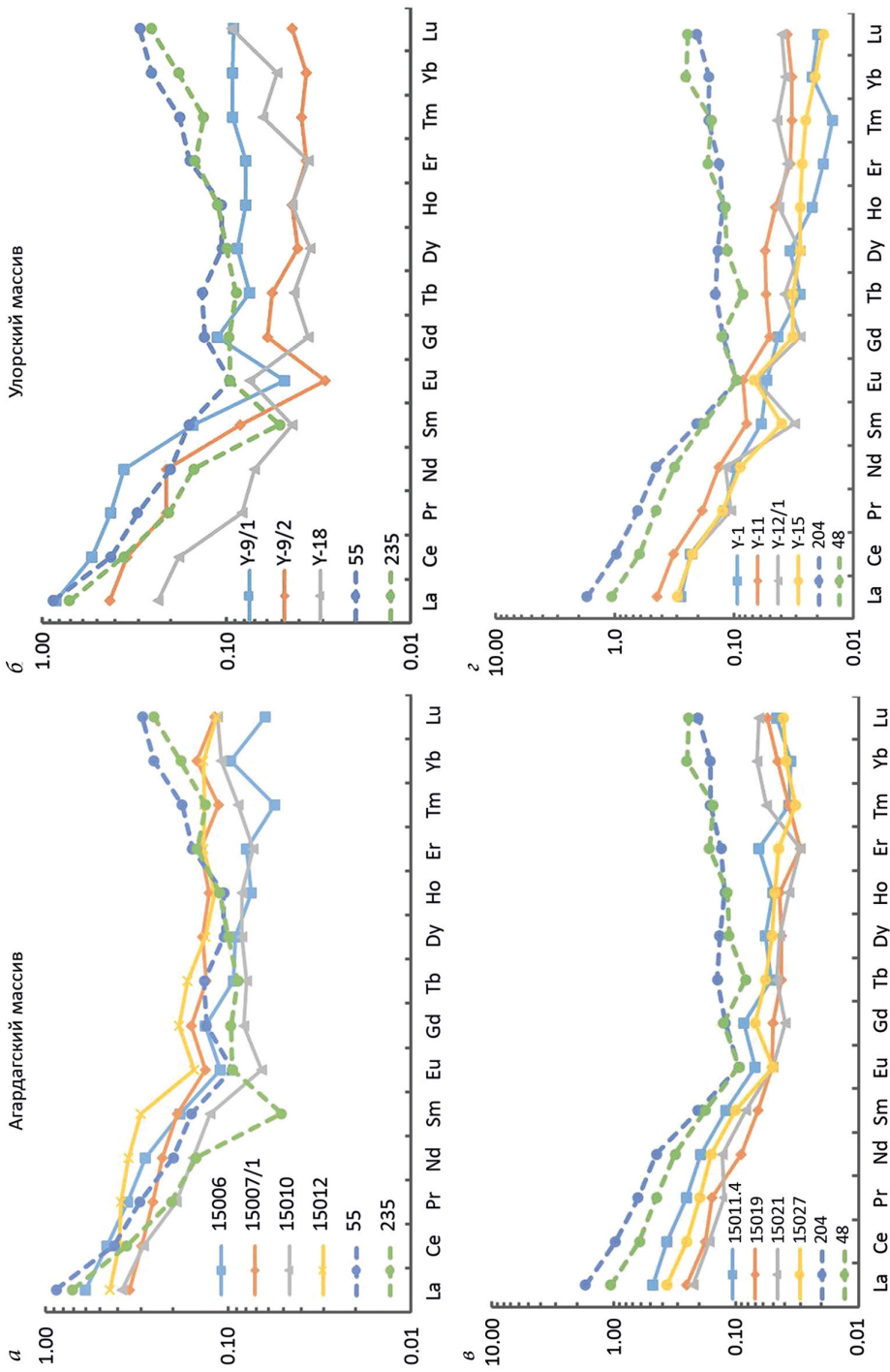


Рис. 5. Распределение содержания редкоземельных элементов для ультрамафитов исследуемых массивов, нормированное по (Воуптон, 1984): Агардагский массив: а — гарцбургиты, б — дуниты; Улорский массив: в — гарцбургиты, г — дуниты. Пунктиром показаны содержания редкоземельных элементов в гарцбургитах (обр. 55 и 235) и дунитах (обр. 204 и 48) Эргакского массива (Рыбакова, 2019)

чением тяжелых элементов. Дуниты Улорского массива отличаются от гарцбургитов постоянным проявлением Eu-максимума с различной интенсивностью, а также последующим трендом уменьшения элементов от средних к тяжелым.

Характер распределения РЗЭ в ультрамафитах Эргакского массива является близким к распределению РЗЭ в ультрамафитах исследуемых массивов (рис. 5). Отмечается тенденция повышенных содержаний РЗЭ в ультрамафитах Эргакского массива, что, вероятно, связано с более низкой степенью их деплетирования.

6. Обсуждение и выводы

Проведенные исследования позволили сравнить дуниты и гарцбургиты Агардагского и Улорского массивов, которые являются фрагментами Южно-Тувинского офиолитового пояса.

Исследуемые массивы локализованы в Агардагской шовной зоне, отделяющей протерозойский Сангиленский срединный сиалический массив от раннекаледонской Восточно-Таннуольской складчатой зоны. Они отличаются по условиям локализации. Агардагский массив залегает среди кристаллических сланцев венд-кембрийского возраста. Вмещающими породами для Улорского массива являются протерозойские высокометаморфизованные образования. При этом породы Агардагского массива и вмещающие их метаморфические образования прорываются более молодыми интрузиями гранитоидов ордовик-девонского возраста, а породы Улорского массива — кембрий-ордовикскими гранитоидами.

В Агардагском массиве преобладают гарцбургиты, тогда как в Улорском — дуниты. В Улорском массиве дуниты и гарцбургиты часто пластически деформированы синтетектонической рекристаллизацией с образованием порфинокластовых структур. Химический состав оливина и хромшпинелидов в дунитах и гарцбургитах в обоих массивах является близким. Оливин по составу отвечает форстериту, при этом для ультрамафитов Улорского массива отмечаются большие вариации Fa и тенденция к уменьшению NiO . Хромшпинелиды в ультрамафитах Улорского массива отличаются более широкими вариациями составов, представлены хромитами, алюмохромитом, субферриалюмохромитом, в них полностью отсутствует V_2O_5 . По составу хромшпинелидов определена степень плавления ультрамафитов, которая оказалась близкой для обоих массивов и составляет ~40–50 %.

Вторичные преобразования энстатита в гарцбургитах Агардагского массива выражаются в замещении баститом и псевдоморфном замещении агрегатами оливин-клинопироксен-тремолит-серпентин-магнетитового состава. Тогда как в Улорском массиве в отличие от Агардагского наблюдаются более высокотемпературное замещение энстатита микрочешуйчатыми агрегатами талька.

По химическому составу дуниты и гарцбургиты исследуемых массивов являются очень близкими. Устанавливаемые незначительные отличия по содержанию петрогенных элементов, очевидно, отражают неравномерную степень деплетирования. Отмечается более высокая хромистость ультрамафитов Агардагского массива, что, вероятно, обуславливает его повышенную потенциальную хромититонность. Повышенные концентрации щелочей в ультрамафитах Улорского массива, очевидно, связаны с влиянием на них более поздних интрузий гранитоидов.

Дуниты и гарцбургиты Агардагского и Улорского массивов имеют близкие тренды распределения РЗЭ. Отмечаемые незначительные отличия, вероятно, связаны как с неравномерной степенью деплетирования исходного мантийного вещества, так и с поздними наложенными метаморфогенными преобразованиями.

Таким образом, дуниты и гарцбургиты Агардагского и Улорского массивов являются интенсивно деплетированными образованиями, возникшими в близких условиях, что влечет близость их породного и вещественного составов. Отмечаемые отличия обусловлены вариациями степени деплетирования и условиями их консолидации в земной коре, определяемые структурной позицией, метаморфизмом вмещающей рамы и внедрением более поздних интрузий.

Литература

- Александровский, Ю.С., Алексеенко, В.Д., Беляев, Г.М., Блюман, Б.А., Булычев, А.В., Должковой, Б.М., Кудрявцев, В.Е., Кухаренко, Е.А., Минаков, А.Н., Минина, Е.А., Мухин, В.Н., Никитина, Л.С., Попова, Н.Н., Радюкевич, Н.М., Сахибгареев, Ю.З., Шор, Г.М. (2008). *Государственная геологическая карта Российской Федерации. М. 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Алтае-Саянская Лист М-46 — Кызыл. Объяснительная записка*. Санкт-Петербург: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ.
- Гоникберг, В.Е. (1999). Роль сдвиговой тектоники в создании орогенной структуры ранних каледонид Юго-Восточной Тувы. *Геотектоника*, 3, 89–103.
- Гончаренко, А.И. (1989). *Деформация и петроструктурная эволюция альпийских гипербазитов*. Томск: Изд-во Томского ун-та.
- Котляров, А.В. (2010). *Петрология офиолитовых ассоциаций Южной и Восточной Тувы*. Дисс. ... канд. геол.-минерал. наук.
- Котляров, А.В., Симонов, В.А. (2018). Магматизм древних задуговых бассейнов — данные по офиолитам Тувы. В: *Петрология магматических и метаморфических комплексов, материалы Всероссийской конференции с международным участием*. Томск: Изд-во Томского ЦНТИ, 193–195.
- Леснов, Ф.П., Подлипский, М.Ю. (2008). Геохимия акцессорных хромшпинелидов из пород Эргакского хромитоносного гипербазитового массива и условия его формирования (Западный Саян). *Доклады Академии наук*, 422, 660–664.
- Лоскутов, И.Ю., Ступаков, С.И., Симонов, В.А. (1999). Петролого-минералогические особенности дунит-гарцбургитового комплекса Агардагского зоны (Юго-Восточная Тува). *Вопросы петрологии, минералогии, геохимии и геологии офиолитов*, 13–23.
- Малахов, И.А. (1983). *Петрохимия главных формационных типов ультрабазитов*. Москва: Наука.
- Никитчин, П.А. (1969). К вопросу о геологическом строении и хромитоносности Агардагского гипербазитового массива. *Материалы по геологии Тувинской АССР*, 1, 43–47.
- Павлов, Н.В. (1949). *Химический состав хромшпинелидов в связи с петрографическим составом пород ультраосновных интрузивов*. Москва: Изд-во АН СССР.
- Пешков, А.А., Чернышов, А.И. (2019). Петрография хромитоносных ультрамафитов Агардагского массива (Юго-Восточная Тыва). *Вестник института геологии Коми научного центра Уральского отделения РАН*, 6 (294), 12–19. <https://doi.org/10.19110/2221-1381-2019-6-12-19>
- Рыбакова, А.В. (2019). *Петрология хромитоносных ультрамафитов Калнинского и Эргакского массивов (северо-восток Западного Саяна)*. Автореферат дисс. ... канд. геол.-минерал. наук.
- Boynnton, W.V. (1984). Geochemistry of the Rare Earth Elements: Meteorite Studies. In: *Rare Earth Element Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier, 63–114.

Статья поступила в редакцию 7 ноября 2019 г.
Статья рекомендована в печать 26 февраля 2021 г.

Контактная информация:

Пешков Алексей Александрович — peshkov@ggf.tsu.ru
Чернышов Алексей Иванович — aich@ggf.tsu.ru

Petrographic and petrogeochemical features of harzburgites and dunites of the Agardag and Ulor massifs (South-Eastern Tyva)*

A. A. Peshkov, A. I. Chernyshov

National Research Tomsk State University,
36, pr. Lenina, Tomsk, 634050, Russian Federation

For citation: Peshkov, A. A., Chernyshov, A. I. (2021). Petrographic and petrogeochemical features of harzburgites and dunites of the Agardag and Ulor massifs (South-Eastern Tyva). *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 66 (2), 331–348. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.208> (In Russian)

The objects of study are the Agardag and Ulor ultramafic massifs, which are part of the South Tuva ophiolite belt. The aim of this work is to study the petrographic, petrochemical and geochemical features of harzburgites and dunites of the studied massifs. As a result of petrographic study, the main types of rocks that make up the studied massifs were identified. Harzburgites predominate in the Agardag massif, while dunites are more common in the Ulor massif. In the Ulor massif, dunites and harzburgites are often plastically deformed by syntectonic recrystallization with the formation of porphyroclastic structures. The chemical compositions of olivine and Cr-spinels in harzburgites and dunites in both massifs are similar. The composition of olivine corresponds to forsterite, while the ultramafic rocks of the Ulor massif show large variations in Fa and a tendency towards a decrease in NiO. Chromium spinels in ultramafic rocks of the Ulor massif have wider compositional variations and are represented by chromites, alumochromite and subferriial alumochromite; they are completely free of V₂O₅. According to the composition of Cr-spinels, the degree of melting of ultramafic rocks was determined, which turned out to be similar for both massifs, ~40–50%. A higher chromium content of the ultramafic rocks of the Agardag massif is noted, which is probably responsible for its increased potential chromite content. Ultramafic rocks of the Agardag and Ulor massifs are intensely depleted formations that arose in similar conditions, which determines the closeness of their rock and material compositions. The revealed differences are due to variations in the degree of depletion and the conditions of their consolidation in the earth's crust, determined by the structural position, as well as metamorphism of the enclosing frame and the introduction of later intrusions.

Keywords: ophiolites, ultramafic rocks, petrography, harzburgites, dunites, petrochemistry, geochemistry.

References

- Aleksandrovskii, Iu. S., Alekseenko, V. D., Beliaev, G. M., Bliuman, B. A., Bulychev, A. V., Dolzhkovi, B. M., Kudriavtsev, V. E., Kukhareno, E. A., Minakov, A. N., Minina, E. A., Mukhin, V. N., Nikitina, L. S., Popova, N. N., Radiukevich, N. M., Sakhibgareev, Iu. Z. and Shor, G. M. (2008). *State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1 000 000 (third generation). Series Altai-Sayanskaya Sheet M-46 — Kyzyl. Explanatory note*. St. Petersburg: Kartograficheskaya fabrika VSEGEI Publ. (In Russian)
- Boynton, W. V. (1984). Geochemistry of the Rare Earth Elements: Meteorite Studies. In: *Rare Earth Element Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier, 63–114.
- Gonikberg, V. E. (1999). The role of strike-slip tectonics in the creation of the orogenic structure of the early Caledonian Southeastern Tuva. *Geotectonics*, 3, 89–103. (In Russian)
- Goncharenko, A. I. (1989). *Deformation and petrostructural evolution of alpine-type hyperbasites*. Tomsk: Tomsk University Press. (In Russian)

* The study was carried out within the framework of a grant under the Decree of the Government of the Russian Federation dated 09.04.2010 No. 220 under an agreement with the Ministry of Education and Science of the Russian Federation No. 14.Y26.31.0012 dated 20.02.2017.

- Kotliarov, A. V. (2010). *Petrology of Ophiolite Associations of Southern and Eastern Tuva*. PhD thesis. (In Russian)
- Kotliarov, A. V. and Simonov, V. A. (2018). Magmatism of ancient back-arc basins — data on ophiolites of Tuva. In: *Petrology of magmatic and metamorphic complexes, materials of the All-Russian conference with international participation*. Tomsk: Tomsk Central Scientific and Technical Institute Publ., 193–195. (In Russian)
- Lesnov, F. P. and Podlipskii, M. Iu. (2008). Geochemistry of accessory Cr-spinels from rocks of the Ergak chromite-bearing hyperbasite massif and the conditions of its formation (Western Sayan). *Reports of the Academy of Sciences*, 422, 660–664. (In Russian)
- Loskutov, I. Iu., Stupakov, S. I. and Simonov, V. A. (1999). Petrological and mineralogical features of the dunite-harzburgite complex of the Agardag zone (South-Eastern Tuva). *Questions of petrology, mineralogy, geochemistry and geology of ophiolites*, 13–23. (In Russian)
- Malakhov, I. A. (1983). *Petrochemistry of the main formational types of ultrabasites*. Nauka Publ. (In Russian)
- Nikitchin, P. A. (1969). On the question of the geological structure and chromite content of the Agardag hyperbasite massif. *Materialy po geologii Tuvinskoi ASSR*, 1, 43–47. (In Russian)
- Pavlov, N. V. (1949). *The chemical composition of Cr-spinels in relation to the petrographic composition of the rocks of ultrabasic intrusions*. Moscow: USSR Academy of Sciences Publ. (In Russian)
- Peshkov, A. A. and Chernyshov, A. I. (2019). Petrography of chromite-bearing ultramafic rocks of the Agardag massif (South-Eastern Tyva). *Bulletin of the Institute of Geology of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*, 6 (294), 12–19. <https://doi.org/10.19110/2221-1381-2019-6-12-19> (In Russian)
- Rybakova, A. V. (2019). *Petrology of chromite-bearing ultramafic rocks of the Kalninsky and Ergak massifs (northeast of the Western Sayan)*. Abstract of the PhD thesis. (In Russian)

Received: November 7, 2019

Accepted: February 26, 2021

Contact information:

Alexey A. Peshkov — peshkov@ggf.tsu.ru

Alexey I. Chernyshov — aich@ggf.tsu.ru