

УДК 549.383+549.731.15(470.5)

## НЕСЕРПЕНТИНИЗИРОВАННЫЕ ГАРЦБУРГИТЫ ВОЙКАРО-СЫНЬИНСКОГО МАССИВА ПОЛЯРНОГО УРАЛА КАК ИЗНАЧАЛЬНЫЙ ИСТОЧНИК ХРОМА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

© 2024 г. К. С. Иванов, Н. В. Вахрушева, член-корреспондент РАН В. Н. Пучков,  
П. Б. Ширяев\*, Н. Н. Фаррахова, А. Е. Богомолова

Поступило 27.12.2023 г.

После доработки 06.02.2024 г.

Принято к публикации 06.02.2024 г.

Исследован состав и возраст несерпентинизированных гарцбургитов, которые встречаются в Войкаро-Сыньинском массиве в виде будин и реликтовых тел в полях развития оливин-антигоритовых пород. Структура, составы пород и минералов, а также распределение редкоземельных элементов и Sm–Nd-абсолютная датировка ( $\approx 2330$  млн лет) позволяют рассматривать эти несерпентинизированные гарцбургиты как фрагменты мантии и наиболее ранние образования среди ультрамафитов Войкаро-Сыньинского массива. Для силикатов этих гарцбургитов характерны повышенные содержания хрома, который при последующих процессах переходит в хромшпинелид. На основе полученных данных выполнена оценка ресурсов хрома, мобилизованного при преобразовании первичных ультрамафитов.

*Ключевые слова:* ультрабазиты, гарцбургиты, хромиты, ресурсы, самарий-неодимовый возраст, Полярный Урал

DOI: 10.31857/S2686739724050086

Актуальность исследований геологии российской Арктики, а особенно её месторождений, весьма высока ([1] и др.). В данной работе предлагается новый метод оценки возможных ресурсов хрома в ультрабазитовых массивах Полярного Урала, образующих здесь крупнейший в мире офиолитовый пояс.

Формирование залежей хромовых руд в ультраосновных комплексах офиолитовой формации в большинстве современных публикаций тем или иным образом связывается с преобразованием вмещающих пород. Этой проблеме посвящено большое количество работ отечественных и зарубежных исследователей, анализ которых приводится в [2] (и ссылки в этой статье). Преобразования пород могут быть итогом воздействия на них расплава ([2] и др.), флюида ([3] и др.), а также происходить в результате метаморфизма ультрамафитовых комплексов ([4] и др.). В процессе преобразования ультрамафитов происходит высвобождение хрома из породообразующих

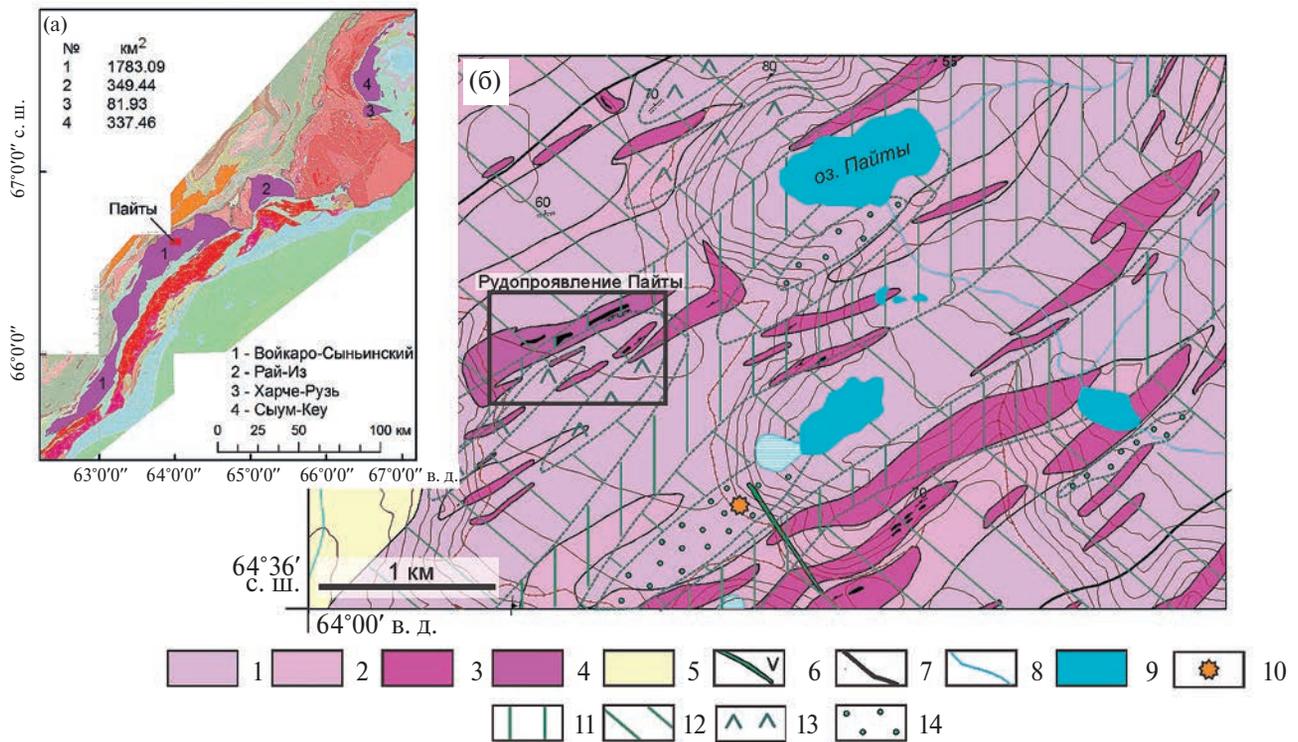
силикатов и его концентрация в оксидной форме в хромшпинелиде. Для объяснения этого явления была предложена модель объёмного метасоматоза массивов альпинотипных ультрамафитов [5], и сделан прогноз хромитоносности (в том числе на глубине) в соответствии с этой моделью [3, 6].

Нами исследован вещественный состав и возраст несерпентинизированных гарцбургитов, которые встречаются в Войкаро-Сыньинском массиве (рис. 1) в виде реликтовых тел в полях развития оливин-антигоритовых пород (т. н. *войкаритов*). Структура, составы пород и минералов, а также распределение редкоземельных элементов и Sm–Nd-абсолютная датировка (см. ниже) позволяют рассматривать эти несерпентинизированные гарцбургиты как наиболее ранние образования среди ультрамафитов Войкаро-Сыньинского массива. На основе полученных данных выполнена оценка ресурсов мобилизованного при преобразовании ультрамафитов хрома.

### МЕТОДЫ

Изотопный состав неодима и самария измерялся на 10-коллекторном масс-спектрометре

Институт геологии и геохимии Уральского отделения  
Российской Академии наук, Екатеринбург, Россия  
\*E-mail: pavel-shiryaev@mail.ru



**Рис. 1.** Геологическая схема района рудопроявления Пайты Войкаро-Сыньинского массива (Полярный Урал), по [7] с изменениями (б). Схема расположения главных хромитоносных ультрабазитовых массивов Полярного Урала (а) по [8]. 1–3 – породы метаморфизованного дунит-гарцбургитового комплекса: 1 – с содержанием дунитовой составляющей 10–30%, 2 – с содержанием дунитовой составляющей 30–50%, 3 – с содержанием дунитовой составляющей более 50%; 4 – дуниты; 5 – четвертичные отложения; 6 – габбро жильные; 7 – тектонические нарушения; 8 – ручьи; 9 – озёра; 10 – место отбора проб на абсолютный возраст; 11 – оливин-антигоритовые породы; 12 – амфибол-оливиновые и амфибол-оливин-антигоритовые породы; 13 – амфибол-энстатит-оливиновые породы; 14 – зоны развития несерпентинизированных гарцбургитов среди амфибол-оливиновых и амфибол-оливин-антигоритовых пород.

“Triton TI” в ГЕОХИ РАН (аналитик С.Ф. Карпенко) с точностью не хуже 0.005% для отношения  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  и 0.1% для отношения  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ . Химический состав породообразующих минералов изучался в ИГГ УрО РАН при помощи электронно-зондового микроанализа по стандартной методике. Микроэлементный состав проб определялся методом ICP-MS (аналитики Ю.Л. Ронкин и О.П. Лепихина, ИГГ) на масс-спектрометре Thermo Finnigan MAT HR/ICP-MS Element2.

На Войкаро-Сыньинском массиве несерпентинизированные гарцбургиты обнажаются на восточном склоне горы Пайты, а также в верховьях р. Левая Пайера, ручья Ямботывис, р. Лагорта-Ю и др. Они представляют собой реликтовые блоки и будины, размером от метра до десятков метров, среди продуктов метаморфизма ультрамафитов – оливин-антигоритовых пород. Блоки несерпентинизированных гарцбургитов встречаются во внутренней части массива, что,

возможно, и обусловило их сохранность при метаморфизме и тектонических процессах. Вмещающие оливин-антигоритовые породы, в разной степени рассланцованные, трассируют линейные тектонические зоны. В гарцбургитах отмечаются единичные жилы вебстеритов, мощностью 10–30 см. На контакте гарцбургитов и оливин-антигоритовых пород развита зона амфибол-энстатит-оливиновых и амфибол-оливин-антигоритовых пород, жилы вебстеритов среди которых превращены в существенно амфиболовые породы.

Несерпентинизированный гарцбургит (обр. 3891) представляет собой среднезернистую породу с порфирукластической или мезогранулярной структурой (рис. 2). Основная масса представлена неравномернозернистым агрегатом оливина. Порфирукласты неправильной формы (размер зёрен 3.5–5.7 мм) количественно преобладает над необластами, обычно образующими субизометричные зёрна размером 0.3–0.7 мм. Границы

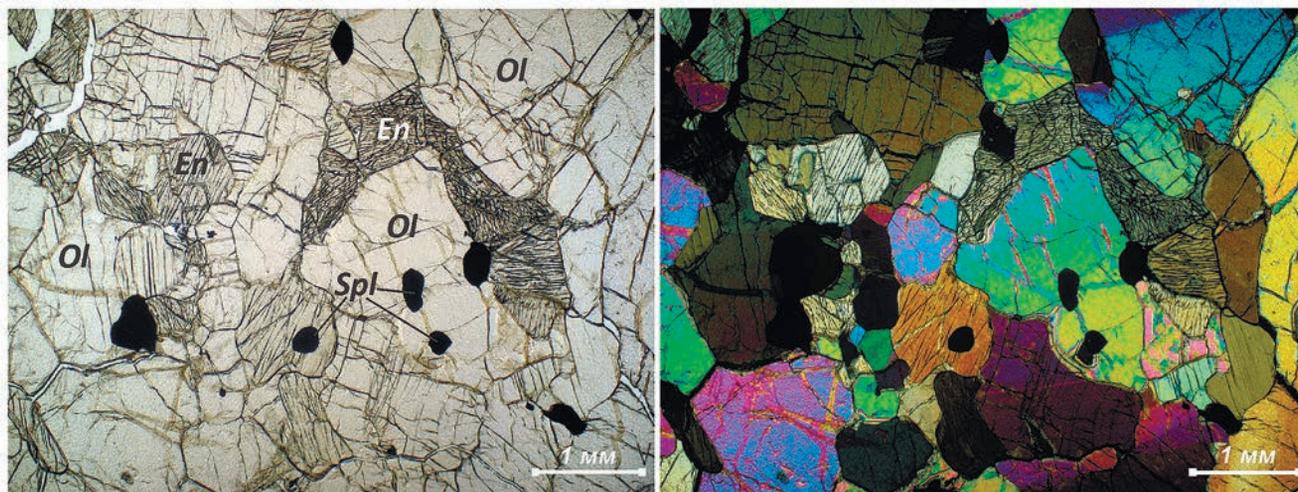


Рис. 2. Несерпентинизированный гарцбургит (обр. 3891). Фото шлифа в проходящем свете; слева — без анализатора, справа — с анализатором. *Ol* — оливин, *En* — энстатит, *Spl* — шпинель.

зёрен чёткие, извилистые. В крупных зёрнах оливина наблюдается неоднородное погасание, полосы скольжения (пластического излома), являющиеся проявлением пластических деформаций. Также в порфиорокластах встречаются включения хромовой шпинели. Микронзондовые исследования оливина позволили обнаружить зёрна этого минерала с повышенным содержанием хрома (табл. 1). Кроме того, в оливине встречены микровключения хромовой шпинели, морфологически идентичные ламелям шпинелида в пироксене.

Содержание нормативного энстатита в несерпентинизированных гарцбургитах варьирует от 15 до 22 мас. %, диоксида — от 0 до 6.5 мас. %. Энстатит, как и хромовая шпинель, ксеноморфен по отношению к оливину. Размер зёрен варьирует от 0.4 до 1.5 мм, форма зёрен неправильная или близкая к таблитчатой, менее деформированная. Содержание  $Al_2O_3$  в энстатитах из несерпентинизированных гарцбургитов варьирует от 1.95 до 2.40%;  $Cr_2O_3$  от 0.40 до 0.57%;  $CaO$  от 0.31 до 0.60%. В отдельных зёрнах энстатита отмечаются ламели клинопироксена, амфибола и хромшпинелида.

Клинопироксены из несерпентинизированных гарцбургитов по химическому составу подразделяются на две группы: к первой относятся диопсиды с содержаниями  $Al_2O_3 = 6.8–7.5\%$ ;  $Cr_2O_3 = 1.5–2.0\%$ ; ко второй — диопсиды, содержащие  $Al_2O_3$  около 2%;  $Cr_2O_3 = 0.4–0.5\%$  (табл. 2). Диопсиды, относящиеся ко второй группе, находятся в парагенезисе с амфиболом. Зёрна амфибола ксеноморфны по отношению к оливину, по оптическим свойствам и химическому составу соответствуют паргаситу. Отмечается перераспределение алюминия из раннего

клинопироксена в амфибол и обеднение им клинопироксена второй генерации.

Хромовая шпинель встречается в виде неравномерной вкрапленности. Зёрна идиоморфной и неправильной формы (размер 0.05–1.2 мм) тёмно-коричневого цвета со светло-коричневой каймой. Также встречаются зёрна с включениями первичных силикатов (оливина и пироксена). Зёрна хромовой шпинели в гарцбургитах зональны (табл. 3): к краю зерна возрастает содержание алюминия при снижении количества хрома. Внешняя, более глинозёмистая часть зерна, по составу идентична ламелям хромшпинелида в энстатите.

Химический состав образца 3891 в мас. %:  $SiO_2 = 42.59$ ,  $TiO_2 = 0.01$ ,  $Al_2O_3 = 0.80$ ,  $Cr_2O_3 = 0.39$ ,  $FeO_{сум} = 7.72$ ,  $MgO = 45.54$ ,  $Na_2O = 0.01$ ,  $K_2O = 0.01$ ,  $MnO = 0.12$ ,  $NiO = 0.28$ , п.п.п. — 0,76.

Гипидиоморфнозернистая структура, высокая железистость оливина  $Fa = 7.19–8.63\%$ , повышенное содержание в оливине и пироксене хрома и алюминия являются типичными для мантийных гарцбургитов [9] и не характерны для продуктов десерпентинизации [10].

Изучение составов и взаимоотношений минералов в несерпентинизированных гарцбургитах позволяет предполагать существование следующих парагенезисов в этих породах:

I:  $Ol\ I\ (Cr) + Orx\ I\ (Al, Ca, Cr) + Crx\ I\ (Al, Cr) + Crsp\ (Cr)$ ;

II:  $Ol\ II + Orx\ II + Crx\ II + Crsp\ (Al) + Am\ (Al)$ ;

где *Ol* — оливин; *Orx* — ортопироксен; *Crx* — клинопироксен; *Crsp* — хромовая шпинель; *Am* — амфибол.

**Таблица 1.** Химический состав оливина из несерпентинизированных гарцбургитов г. Пайты

№ обр.	3891	3891	3891	3891	3891	3891
№ зерна	1	2	3	4	5	6
SiO <sub>2</sub>	40.51	40.58	40.66	41.45	40.02	40.32
MgO	49.69	51.26	50.17	50.11	49.50	49.39
FeO	8.37	8.10	8.39	8.16	6.85	7.72
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.02	0.00	0.00	0.04	0.00
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.48	0.25	0.00	0.06	0.26	0.22
CaO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Сумма	99.05	100.20	99.22	99.78	96.67	97.65
Si	0.997	0.983	0.997	1.012	1.003	1.004
Mg	1.821	1.848	1.831	1.821	1.847	1.831
Fe	0.172	0.164	0.172	0.166	0.143	0.160
Ca	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Al	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000
Cr	0.009	0.005	0.000	0.001	0.005	0.004
Fa, %	8.63	8.15	8.59	8.35	7.19	8.04

Примечание: Fa = 100% × Fe/(Fe + Mg).

**Таблица 2.** Химический состав пироксенов из несерпентинизированных ультрамафитов г. Пайты

№ пробы	3891-1		3891-2		3906-1		3906-2	
	3891-1	3891-2	3906-1	3906-2	3891-1	3891-2	3906-1	3906-2
	Клинопироксен				Ортопироксен			
SiO <sub>2</sub>	53.97	49.39	54.31	54.44	57.08	57.25	55.01	55.18
TiO <sub>2</sub>	0.04	0.00	0.09	0.09	0.00	0.00	0.06	0.05
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.30	6.99	2.08	2.01	2.32	2.40	2.00	2.04
FeO	1.61	2.95	2.26	2.16	5.75	5.79	6.92	7.10
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.72	2.35	0.62	0.63	0.57	0.53	0.46	0.48
MnO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MgO	17.65	17.74	17.75	17.68	33.97	34.16	33.15	32.67
CaO	24.43	22.38	23.48	23.35	0.53	0.33	0.51	0.44
K <sub>2</sub> O	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Na <sub>2</sub> O	0.11	0.00	0.28	0.26	0.04	0.04	0.02	0.02
Сумма	100.83	101.80	100.87	100.63	100.26	100.50	98.13	97.98
Si	1.940	1.759	1.951	1.961	1.964	1.964	1.939	1.952
Ti	0.001	0.000	0.002	0.002	0.000	0.000	0.002	0.001
Al	0.097	0.293	0.088	0.085	0.094	0.097	0.083	0.085
Al <sub>6</sub>	0.037	0.052	0.039	0.046	0.058	0.061	0.022	0.037
Al <sub>4</sub>	0.060	0.241	0.049	0.039	0.036	0.036	0.061	0.048
Fe	0.048	0.088	0.068	0.065	0.165	0.166	0.204	0.210
Cr	0.020	0.066	0.018	0.018	0.015	0.014	0.013	0.013
Mn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mg	0.945	0.941	0.950	0.948	1.740	1.744	1.740	1.721
Ca	0.941	0.854	0.904	0.901	0.020	0.012	0.019	0.017
Na	0.008	0.000	0.019	0.018	0.003	0.003	0.001	0.001

**Таблица 3.** Химический состав аксессуарных хромовых шпинелей из несерпентинизированных ультрамафитов г. Пайты

№ обр.	3891	3891	3891	3891	3906
зерно	1 центр	1 край	3 центр	3 кайма	центр
TiO <sub>2</sub>	0.01	0.01	0.01	0.01	0.15
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	33.20	32.62	32.60	29.05	37.91
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	34.59	35.29	33.62	37.80	28.72
FeO	19.43	19.26	19.93	19.17	23.08
MnO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.29
MgO	13.58	14.01	13.21	14.04	11.19
Сумма	100.80	101.18	99.36	100.06	101.34
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.027
Cr	6.085	5.929	6.078	5.275	7.181
Al	9.457	9.568	9.350	10.238	8.115
Fe <sup>3</sup>	0.458	0.503	0.572	0.487	0.677
Fe <sup>2</sup>	3.306	3.198	3.355	3.192	3.944
Mn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.059
Mg	4.694	4.802	4.645	4.808	3.997

Состав клинопироксена в вебстеритовой жиле близок диопсиду II генерации из гарцбургита. Отличие состоит в несколько повышенном содержании натрия и более высокой железистости в диопсиде из пироксенита (табл. 2). Для энстатита из вебстеритов также характерна повышенная железистость, по сравнению с ортопироксеном из гарцбургита. Хромовая шпинель в пироксенитах существенно более хромистая и железистая, чем в гарцбургитах, с заметной примесью титана и марганца.

Образцы из центральной части тела несерпентинизированного гарцбургита близки по количеству РЗЭ (Σ 2.03–2.34 г/т). Гарцбургит из эндоконтактной части тела, вторичные изменения в котором проявлены лишь в следах деформации минералов (полосы скольжения и полисинтетические двойники в оливине и пироксенах), несколько обеднен лантаноидами при сохранении типа спектра (Σ 1.46 г/т) (рис. 3). Для вебстерита характерно заметно более высокое содержание РЗЭ (Σ 5.52 г/т), при некотором обогащении породы тугоплавкими лантаноидами.

Sm/Nd-данные получены (табл. 4, рис. 4) по породообразующим минералам и валовым составам гарцбургита (обр. 3891) и вебстерита (обр. 3906). Возраст гарцбургита, определённый по клинопироксену, ортопироксену, оливину и валовому составу составил 2331±270 млн лет (MSWD = 1.8); для вебстерита – 840±160 млн лет (MSWD = 0.81), определён по орто-, клинопироксену и валовому составу.

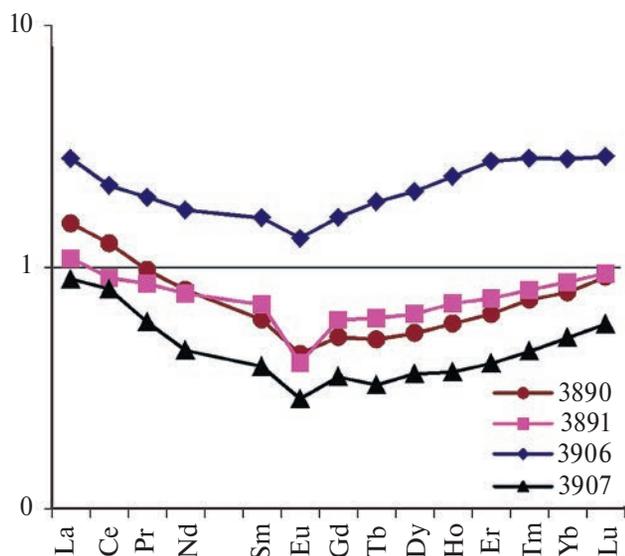


Рис. 3. Спектры РЗЭ в несерпентинизированных ультрамафитах г. Пайты, Войкаро-Сыньинский массив, нормированные к хондриту [11]; обр. 3890, 3891, 3907 – гарцбургит; обр. 3906 – вебстерит.

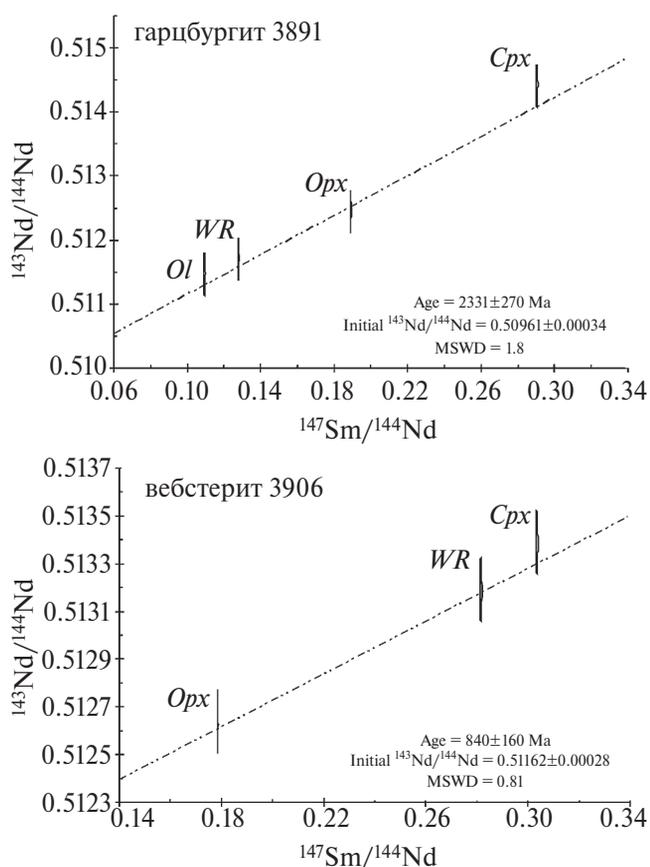


Рис. 4. Sm–Nd-изохроны для образцов гарцбургита и вебстерита г. Пайты. *Opx* – ортопироксен; *Cpx* – клинопироксен; *Ol* – оливин; *WR* – валовая проба соответствующей породы.

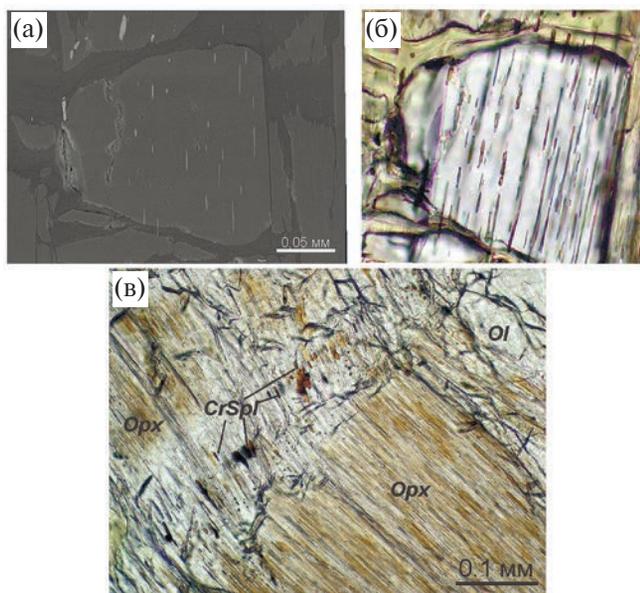
Таблица 4. Sm–Nd-изотопная система гипербазитов

Минерал	Содержание, г/г		Изотопные отношения	
	Sm	Nd	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$
Вебстерит, обр. 3906				
Диопсид	0.230	0.460	0.3033	0.513324
Вал	0.142	0.305	0.2814	0.513139
Энстатит	0.080	0.270	0.1788	0.512615
Гарцбургит, обр. 3891				
Диопсид	0.725	1.51	0.2906	0.514162
Вал	0.036	0.171	0.1281	0.511604
Энстатит	0.0027	0.0087	0.1892	0.512314
Оливин	0.004	0.023	0.1095	0.511384

Изучение изотопии Sm и Nd для пород Войкаро-Сыньинского массива проводилось и ранее [12]. 8 проб (гарцбургита, дунита и вебстерита из мантийной части разреза и вышележащих габбро и диабаза) определили Sm–Nd-изохрону, соответствующую возрасту  $387 \pm 34$  млн лет. Однако одна проба несерпентинизированного гарцбургита (V-32, из северной части массива, ручей Ямботовис) оказалась далеко от линии корреляции, что “указывает на присутствие более древнего мантийного источника” [12], причём объём этих древних пород остался неизвестен. Древние возраста пород (1.6 млрд лет и более) для мантийных гарцбургитов Войкаро-Сыньинского массива были получены в [13]. Это в целом согласуется с полученными нами данными.

Полученные результаты показывают, что для несерпентинизированных гарцбургитов характерно высокое содержание хрома. Важно отметить вхождение этого элемента в состав породообразующих силикатов – ромбический и моноклинный пироксен, а также оливин. Сопоставление химизма минералов, входящих в ассоциации I и II, показывает более низкое содержание хрома во всех силикатных минералах более позднего парагенезиса, что позволяет рассматривать первичный парагенезис как источник хрома для генерации хромовых руд. Гарцбургиты, породообразующие силикаты которых аналогичны по химическому составу ассоциации II, вмещают хромовое оруденение в пределах Лехойлинского, Косшорского, и Лагортинского рудных полей Войкаро-Сыньинского массива.

Многочисленными исследованиями показан твердофазный распад силикат–хромшпинелид, в результате которого хром перераспределяется из силикатных фаз в окисную ([2, 4, 14, 15]



**Рис. 5.** Формы выделения ламелей хромшпинелида в зёрнах ромбического пироксена из слабо метаморфизованного гарцбургита ручья Безымянный (66°51'57.5" с. ш.; 65°36'51.1" в. д.): а, б – вдоль трещин спайности: а – BSE-изображение, б – проходящий свет без анализатора; в – укрупнение ламелей хромшпинелида в зоне деформаций зерна энстатита из слабо метаморфизованного гарцбургита.

и др.). Этот процесс обычно считается началом рудообразования [14, 15].

В породообразующих силикатах рудовмещающих апогарцбургитов месторождений хромитов Полярного Урала (Центральное, Западное, № 214 и др.), содержание хрома в главных породообразующих минералах ортопироксене и оливине около 0.1% и менее ([4, 7] и др.) то есть ниже, чем в минералах исследованных несерпентинизированных гарцбургитов, мантийных ксенолитов гарцбургитов [9] и абиссальных ультрамафитов [16], а диопсид отсутствует в составе пород. Отсюда (и из таблиц 1–3) следует, что минералы этих ультрамафитов испытали твердофазный распад, в результате которого произошло их обеднение Cr, который, по всей видимости, был вынесен из силикатов и сконцентрирован в рудообразующих хромшпинелидах, сформировавших рудные тела.

Показанное выше изменение содержания хрома в рудовмещающих ультраосновных породах по сравнению с первичными (наиболее древними) их разностями было применено нами для расчёта ресурсного потенциала хромитоносных массивов и площадей Полярного Урала. Были использованы авторские данные о содержании Cr в несерпентинизированных гарцбургитах,

а также в рудовмещающих ультрамафитах рудопроявлений Пайты и Бурхойлинское Войкаро-Сыньинского массива, месторождения Центральное массива Рай-Из и средние данные для полярноуральских ультрамафитовых массивов, полученные методом ICP-MS.

Площади ультраосновных массивов вычислены по государственным геологическим картам масштаба 1:200 000 ([8] и др.), привязанным к истинным координатам при помощи ГИС-систем (см. рис. 1). Сведения о геологии и тектонике региона приведены в ([3, 4, 7, 8] и др.).

Таким образом, общая площадь 4 крупных ультрамафитовых массивов Полярного Урала (см. рис. 1 а) составляет 2552 км<sup>2</sup>, что при их средней мощности, обычно количественно оцениваемой геофизиками (И.Ф. Таврин [17], Н.Г. Берлянд ([8] и др.) и др.) как 3.5 км, определяет оценку объёма ультрамафитов главных массивов региона как 8932 км<sup>3</sup> (±5–7%). Площади конкретных месторождений и рудопроявлений взяты из ([3, 4, 8, 18] и др.), мощность ультрамафитов для расчёта ресурсов условно принята лишь равной глубине проводившейся ранее разведки или оценки (т.е. полученные цифры в таблице 5 следует рассматривать для конкретных рудопроявлений как далеко не максимальные). Содержание хрома в хромовой руде принято – 300 000 г/т, удельный вес ультрамафитов – 3.2 г/см<sup>3</sup>.

Расчёт потенциальных ресурсов хромовой руды производился следующим образом: (1) определялась масса ультрамафитов изучаемого объекта путём умножения их объёма на удельный вес; (2) определялся избыток хрома в ультрамафитах, для чего содержание Cr в ультрамафитах (г/т) вычиталось из такового в несерпентинизированном гарцбургите; (3) рассчитывался ресурс Cr, выделившегося из ультрамафитов путём умножения массы ультрамафитов на избыток хрома; (4) потенциальные ресурсы хромовых руд определялись путём деления ресурса хрома, определённого на шаге 4 на содержание компонента в хромите (г/т). Результаты расчёта представлены в таблице 5. Конечно, не весь выделенный из силикатов хром уходил в конечном итоге на формирование месторождений, поэтому полученные оценки следует рассматривать как максимально возможные. Условно принимается, что ныне эродированные части ультраосновных массивов были столь же богаты месторождениями, что и сохранившиеся (на единицу объёма).

**Таблица 5.** Расчёт потенциальных ресурсов хромовых руд в ультрамафитовых массивах Полярного Урала

Объект	Месторождение Центральное	Рудопроявление Пайты	Рудопроявление Бурхойлинское	Войкаро- Сыньинский массив	Полярный Урал
Площадь, м <sup>2</sup>	2 000 000	1 113 322	832 000	1 783 000 000	2 551 000 000
Мощность, м	500	300	300	3000	3500
Объём, м <sup>3</sup>	1×10 <sup>9</sup>	333 996 600	249 600 000	5,349×10 <sup>12</sup>	8,928×10 <sup>12</sup>
Масса перидо- титов, т	3.2×10 <sup>9</sup>	1 068 789 120	798 720 000	1,7×10 <sup>13</sup>	2.9×10 <sup>13</sup>
Cr, сред	2388	2165	3591	4000	4000
Избыток хрома, г/т	1856	2079	653	244	424
Ресурс Cr, г	5.9×10 <sup>12</sup>	2.2×10 <sup>12</sup>	5.2×10 <sup>11</sup>	4.2×10 <sup>15</sup>	1.2×10 <sup>16</sup>
Cr в хромите, г/т	300 000	200 000	250 000	300 000	250 000
Ресурсы хроми- та, млн т	19.8	11.1	2.1	13 921.7	48 456.8
Сумма ресурсов и запасов по [8, 18], млн т	20.5	2.667	0.729	355.6	1440

Для локальных объектов – месторождения Центрального, рудопроявлений Бурхойлинское и Пайты получено хорошее соответствие уже установленных суммарных запасов и ресурсов с результатами нашего расчёта. Для месторождения Центральное разница составляет всего 0.7 млн т (т.е. около 3%). Региональный прогноз (на уровне массивов и Полярного Урала в целом) даёт очень высокие значения, превышающие общемировые разведанные запасы хрома. Даже если подсчитать ресурсы лишь для наиболее экономически реальных для разработки верхних 0.5 км глубины массивов, эта цифра составит 6920 млн т, что примерно в 20 раз превышает разведанные запасы хромитов уникального Кемпирсайского массива Южного Урала. Это с одной стороны говорит о весьма высоком рудном потенциале полярноуральских ультрабазитов, а с другой стороны свидетельствует о том, что образование хромовых руд, вероятнее всего, происходило в результате локальных процессов или под влиянием локального изменения физико-химических и геологических условий. К таким условиям можно отнести и повышение тектонического давления в пределах зон сдвиговых деформаций, сопровождавших метаморфизм и подъём массива на этапе коллизии [4, 17]. На рис. 5 показан пример выделения ламелей хромшпинелида вдоль зоны деформации в зерне энстатита из гарцбургита, являющийся моделью такого процесса.

Приведённые данные (абсолютный возраст, химизм пород и породообразующих минералов,

соответствующий глубинным ксенолитам) свидетельствуют, что исследованные несерпентинизированные гарцбургиты, по всей видимости, являются уникальными реликтами наименее изменённой первичной мантии, что позволяет рассматривать их не только как “исходную точку” метаморфических процессов, но и рудообразования в ультрамафитах Полярного Урала. Возраст вебстеритов, кристаллизовавшихся из расплавов, образовавшихся в результате частичного плавления мантийного субстрата [19], получился несколько более древний (840±160 млн лет), чем датировки, полученные ранее (586±6 млн лет [20]) по цирконам из хромитовых руд того же участка Войкаро-Сыньинского массива. Это, по всей видимости, может свидетельствовать о временном разрыве процессов импрегнации ультрамафитов отделяющимся базальтоидным расплавом и процесса хромитообразования. Установленные наиболее высокие содержания хрома во всех минералах исходного гарцбургита (парагенезис I) позволяют предполагать, что именно породы этого типа являлись первичным источником хрома для месторождений Полярного Урала, формирование которых есть финальный результат сложных и продолжительных процессов его высвобождения из первичных силикатных минералов, сегрегации и концентрации. Отмеченное снижение содержаний хрома в минералах при последующих преобразованиях (парагенезис II), по-видимому, фиксирует начало этих процессов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят доктора геол.-мин. наук С.А. Силенцева за обсуждение статьи и замечания, способствовавшие её улучшению.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования проводятся за счёт гранта Российского научного фонда № 22-17-00027, <https://rscf.ru/project/22-17-00027/> и гос.бюджетной темы ИГГ УрО РАН № 123011800014-3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бортников Н. С., Лобанов К. В., Волков А. В., Галямов А. Л., Викентьев И. В., Тарасов Н. Н., Дистлер В. В., Лаломов А. В., Аристов В. В., Мурашов К. Ю. Месторождения стратегических металлов Арктической зоны // Геология рудных месторождений. 2015. Т. 57. № 6. С. 479–500.
2. Arai S., Miura M. Formation and modification of chromitites in the mantle // *Lithos.*, 2016. V. 264. P. 277–295.
3. Макеев А. Б., Брянчанинова Н. И. Топоминералогия ультрабазитов Полярного Урала. СПб.: Наука, 1999. 252 с.
4. Вахрушева Н. В., Ширяев П. Б., Степанов А. Е., Богданова А. Р. Петрология и хромитоносность ультраосновного массива Рай-Из Полярный Урал. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2017. 265 с.
5. Макеев А. Б. Эволюция минеральных парагенезисов альпинотипных ультрабазитов Урала. Дисс. на соиск. уч. степ. доктора г.-м. наук в форме доклада. СПб.: Горный институт, 1992. 46 с.
6. Макеев А. Б. Модель строения и прогноз хромитоносности альпинотипных ультрабазитов // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. 1997. № 2. С. 3–5.
7. Вахрушева Н. В. Метаморфизм хромитоносных гипербазитов Полярного Урала: автореф. дис. канд. геол.-мин. наук. Екатеринбург, 1996. 24 с.
8. Мельгунов А. Н., Морозов А. Ф., Водолазская В. П., Жданов А. В., Берлянд Н. Г., Верник И. И. Основные черты геологического строения и минерально-сырьевой потенциал Северного, Приполярного и Полярного Урала. СПб.: “ВСЕГЕИ”, 2010. 273 с.
9. Arai S., Ishimaru S. Insights into Petrological Characteristics of the Lithosphere of Mantle Wedge beneath Arcs through Peridotite Xenoliths: a Review // *Journal of Petrology.* 2008. V. 49 (4). P. 665–695. <https://doi.org/10.1093/petrology/egm069>
10. Плечов П. Ю., Щербаков В. Д., Некрылов Н. А. Экстремально магнезиальный оливин в магматических породах // Геология и геофизика. 2018. Т. 59. № 12. С. 2129–2147.
11. Sun S.-S., McDonough W. F. Chemical and Isotopic Systematic of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes // *Geol. Soc. Spec. Publ. London.* 1989. V. 42. P. 313–345.
12. Sharma M., Wasserburg G. J., Pappanastassiou D. A., Quick J. E., Sharkov E. V., Laz'ko E. E. High <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd in extremely depleted mantle rocks // *Earth and Planetary Science Letters.* 1995. V. 135. № 1–4. P. 101–114.
13. Буякайте М. И., Виноградов В. И., Кулешов В. Н., Покровский Б. Г., Савельев А. А., Савельева Г. Н. Геохимия изотопов в офиолитах Полярного Урала // Труды ГИН АН СССР. № 376. М.: Наука, 1983. 184 с.
14. Савельева Г. Н., Батанова В. Г., Соболев А. В. Твердофазовый распад пироксен-хромшпинель в мантийных лерцолитах офиолитового массива Сыум-Кей на Полярном Урале // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 10. С. 1808–1827.
15. Савельев Д. Е., Пучков В. Н., Сергеев С. Н., Мусабиров И. И. О деформационно-индуцированном распаде энстатита в мантийных перидотитах и его значении для процессов частичного плавления и хромитообразования. // ДАН. 2017. Т. 476. № 2. С. 200–204.
16. Warren J. M. Global variations in abyssal peridotite compositions // *Lithos.* 2016. V. 248–251. P. 193–219.
17. Пучков В. Н., Таврин И. Ф., Перевозчиков Б. В., Волченко Ю. А., Ашмов В. Ю., Царицын Е. П., Чашухин И. С. и др. Строение, эволюция и минерогения гипербазитового массива Рай-Из. Свердловск: ИГГ УрО АН СССР, 1990. 229 с.
18. Перевозчиков Б. В., Булыкин Л. Д., Попов И. И., Орфаницкий В. Л., Андреев М. И., Сначев В. И. Реестр хромитопроявлений в альпинотипных ультрабазитах Урала. Пермь: КАМНИИКИГС, 2000. 474 с.
19. Белоусов И. А., Батанова В. Г., Савельева Г. Н., Соболев А. В. Свидетельство надсубдукционной природы мантийных пород Войкаро-Сыньинского офиолитового массива, Полярный Урал // ДАН. 2009. Т. 429. № 2. С. 238–243
20. Савельева Г. Н., Суслов П. В., Ларионов А. Н. Вендские тектоно-магматические события в мантийных комплексах офиолитов Полярного Урала: данные U-Pb датирования циркона из хромититов // Геотектоника. 2007. № 2. С. 23–33.

## UNSERPENTINIZED HARZBURGITES OF THE VOIKARO-SYNYINSKY MASSIF OF THE POLAR URALS AS THE INITIAL SOURCE OF CHROMIUM FOR THE FORMATION OF DEPOSITS

**K. S. Ivanov, N. V. Vakhrusheva**, Corresponding Member of the RAS **V. N. Puchkov,**  
**P. B. Shiryaev**<sup>#</sup>, **N. N. Farrakhova, A. E. Bogomolova**

*Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia*

<sup>#</sup>*E-mail: pavel-shiryaev@mail.ru*

The composition and age of unserpentinized harzburgites, which are found in the Voikaro-Synyinsky massif in the form of budins and relict bodies in the fields of olivine-antigorite rocks development, have been studied. The structure, compositions of rocks and minerals, as well as the distribution of rare-earth elements and Sm-Nd absolute dating ( $\approx 2330$  million years) allow us to consider these unserpentinized harzburgites as fragments of the mantle and the earliest formations among the ultramafic Voikaro-Synyinsky massif. The silicates of these harzburgites are characterized by increased chromium content, which in subsequent different processes turns into chromium spinelide. Based on the data obtained, the resources of chromium mobilized during the transformation of primary ultramafics were evaluated.

*Keywords:* ultrabasites, harzburgites, chromites, resources, samarium-neodymium age, Polar Urals