Rundkvist D. V., *Denisenko V. K.*, *Pavlova I. G.* Greisen deposits (ontogeny and phylogeny). Moscow: Nedra, **1971.** 328 p. (*in Russian*).

Semenov E. I. Ores and minerals of rare earths, thorium and uranium (lanthanides and actinides). Moscow: GEOS, **2001.** 307 p. (*in Russian*).

Semenyak B. I. About «zwitters» of the Verkhneurmiyskiy ore field. In: *Far East ore deposits.* Vladivostok, **1983.** P. 20—25 (*in Russian*).

Semenyak B. I., *Efimenko S. A.*, *Korostelev P. G.*, *Tkachenko G. A.* Metallogeny of Badzhalsky ore district. In: *Metallogeny of the main ore regions of the Far East.* Vladivostok: FEB USSR AS, **1988.** P. 57—84 (*in Russian*).

Simmons W. B., *Hanson S. L.*, *Falster A. U.* Samarskite-(Yb): a new species of the samarskite group from the little patsy pegmatite, Jefferson county, Colorado. *Canad. Miner.* **2006.** Vol. 44. P. 1119—1125.

Singh Y., *Pandit P. S. C.*, *Bagora S.*, *Jain P. K.* Mineralogy, geochemistry, and genesis of co-genetic granite-pegmatite-hosted rare metal and rare earth deposits of the Kawadgaon area, Bastar craton, Central India. *J. Geol. Soc. of India*. **2017.** Vol. 89. Iss. 2. P. 115—130.

Vasiljev N. V., *Chevychelov V. Yu.*, *Zaraisky G. P. et al.* Peculiarities of tantalic-niobic mineralization of Taikeusky ore knot (Polar Urals). *Zapiski RMO* (*Proc. Russian Miner. Soc.*). **2008.** N 5. P. 1—16 (*in Russian*).

Vinogradova L. G., *Barabanov V. F.*, *Sorokin N. D.* About distribution of iron, manganese, niobium and scandium in wolframites. *Zapiski RMO* (*Proc. Russian Miner. Soc.*). **1980.** N 3. P. 352—358 (*in Russian*).

Voloshin A. V. Tantalic-niobates. Systematics, crystal chemistry and evolution of minerogenesis in granite pegmatites. Saint Petersburg.: Nauka, **1993.** 298 p. (*in Russian*).

Watanabe Y., *Kon Y.*, *Echigo T.*, *Kamei A.* Differential fractionation of rare earth elements in oxidized and reduced granitic rocks: implication for heavy rare earth enriched ion adsorption mineralization. *Resource Geol.* **2017.** Vol. 67. Iss. 1. P. 35—52.

Yang W.-B., *Niu H.-C.*, *Shan Q. et al.* Geochemistry of magmatic and hydrothermal zircon from the highly evolved Baerzhe alkaline granite: implications for Zr-REE-Nb mineralization. *Miner. Deposita.* **2013.** Vol. 49. Iss. 4. P. 451—470.

Yuan S., *Peng J.*, *Hu R. et al.* A precise U-Pb age on cassiterite from the Xianghualing tin-polymetallic deposit (Hunan, South China). *Miner. Deposita.* **2008.** Vol. 43. P. 375—382.

Yurgenson G. A. Typomorphism and ore formations. Novosibirsk: Nauka, **2003.** 368 p. (*in Russian*).

Xiong Y.-Q., *Shao Y.-J.*, *Zhou H.-D. et al.* Ore-forming mechanism of quartz-vein-type W-Sn deposits of the Xitian district in SE China: Implications from the trace element analysis of wolframite and investigation of fluid inclusions. *Ore Geol. Rev.* **2017.** Vol. 83. P. 152—173.

Поступила в редакцию
10 января 2017 г.

УДК 549.621.9:552.321.6

ЗРМО, № 1, 2018
Zapiski RMO, N 1, 2018

© А. Н. ЮРИЧЕВ, А. А. РОЗЕНБУШ,* А. С. КУЛЬКОВ***

УВАРОВИТ ИЗ ХРОМИТИТОВ АГАРДАГСКОГО УЛЬТРАМАФИТОВОГО МАССИВА (РЕСПУБЛИКА ТЫВА): ХИМИЗМ И ВОПРОСЫ ГЕНЕЗИСА

** Томский государственный университет,*
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36; e-mail: juratur@sibmail.com
*** Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,*
634055, г. Томск, пр. Академический, 2/4; e-mail: 727@ispms.ru

Объектом исследования являются ранее не охарактеризованные уваровитовые гранаты из хромититовых тел Агардагского ультрамафитового массива Южной Тывы. Авторами впервые детально изучены их типоморфные черты и особенности химического состава. Минерал отме-

чается как в виде кристаллических форм, так и в виде тонкозернистых агрегатов в тесной ассоциации с кальцитом, серпентином и хромсодержащим хлоритом. Среди проанализированных известково-хромистых гранатов выделены три разновидности: уваровит—гроссуляр, уваровит—гроссуляр—андрадит и уваровит—андрадит—гроссуляр. Гранаты уваровит-гроссулярового ряда обнаруживают сходство с уваровитовыми гранатами Сарановского (Средний Урал) и Длинногорского (Корякия) ультрамафитовых массивов, но отличаются от них несколько большей железистостью и полным отсутствием в составе TiO_2. По генетической природе изученные уваровитовые гранаты отнесены к апоультрамафитовым гидротермальным образованиям, что подтверждается их типоморфными особенностями, сосуществующим минеральным парагенезисом, а также постоянно отмечаемыми структурами растворения на гранях кристаллов.

Ключевые слова: Агардагский массив, хромититы, уваровитовые гранаты, типоморфизм, химический состав, генезис.

A. N. YURICHEV,* *A. A. ROZENBUSH*,* *A. S. KULKOV*.** UVAROVITE FROM CHROMITITES OF THE AGARDAG ULTRAMAFIC MASSIF (TYVA REPUBLIC): CHEMISTRY AND GENESIS

* *Tomsk State University*, *Russia*
** *Institute of Strength Physics and Materials Science of SB RAS*, *Tomsk*, *Russia*

Object of the study is previously undefined uvarovite garnets of Agardag ultramafic massif in South Tyva. Their typomorphic features and chemical composition have been investigated for the first time. These minerals occur both in form of crystals and as fine-grained aggregates in close association with calcite, serpentine and chromium-bearing chlorite. According to decreasing contents of minals in chemical composition, there were distinguished three joins of calcium-chromium garnets: uvarovite-grossular, uvarovite-grossular-andradite, and uvarovite-andradite-grossular. Minerals of uvarovite-grossular join have composition close to uvarovite garnets of Saranovsky (the Middle Urals) and Dlinnogorsky (Koryakia) ultramafic massifs, but differing from them by somewhat higher Fe content and complete absence of TiO_2. According to their genetic nature, studied uvarovite garnets belong to apo-ultramafic hydrothermal formation, this is confirmed by their typomophic features, coexisting minerals and constantly remarked structures of dissolution on crystal faces.

Key words: Agardag massif, chromitites, uvarovite garnets, typomorphism, chemical composition, genesis.

Ультрамафитовые реститовые массивы дунит-гарцбургитового состава являются составной частью мафит-ультрамафитовых поясов складчатых областей. В последние несколько десятилетий они привлекают все большее внимание исследователей как с позиции генезиса, учитывая их мантийную природу образования и связь с ранними этапами развития складчатых сооружений, так и с позиции рудоносности — своей промышленной хромитоносностью, асбестоносностью и присутствием благороднометалльной минерализации. Однако в настоящее время спорность многих аспектов петрологии реститовых ультрамафитов обусловлена недостаточной изученностью этих интереснейших образований. В частности, недостаточная проработанность минералогических аспектов данных массивов не дает возможности полного обобщения этих объектов на минералогическом уровне. Известно, что одним из главных носителей генетической информации является минерал, а не только порода. В связи с этим, изучив в достаточной степени минералогию объекта, можно реконструировать историю его образования и преобразования.

К настоящему времени находки уваровитовых гранатов в ультрамафитах офиолитовых комплексов на территории России выявлены и охарактеризованы на примере незначительных выборок минерала на Урале в хромовых рудах Рай-Изского, Сыум-Кеуского, Войкаро-Сыньинского, Нижнетагильского

и Сарановского массивов (Юшкин и др., 1986; Макеев, 1992; Иванов, Бушмакин, 1998; Жданова, Астахова, 2009; Савельева, Белокрыс, 2012). В пределах последнего массива, в 1831 г. уваровит был открыт и продиагностирован химиком Г. И. Гессом и некоторое время специально разрабатывался на Южно-Сарановском месторождении. Для остальных складчатых регионов России информация о находках и составе уваровитовых гранатов в реститовых ультрамафитах в печатных источниках не найдена, либо крайне ограничена. В работе авторами впервые выполнено детальное исследование уваровитовых гранатов из рудных ультрамафитов Агардагского массива (республика Тыва) (Юричев и др., 2013).

Краткая геологическая характеристика исследуемого объекта. Агардагский ультрамафитовый массив [R_3, по (Pfander et al., 2002; Козаков и др., 2003)] является одним из крупных в составе Южно-Тувинского пояса и структурно приурочен к Агардагской шовной зоне, которая отделяет Сангиленский срединный массив от раннекаледонской Восточно-Таннуольской складчатой зоны. Он представляет собой линзообразное тело длиной около 20 км при ширине до 3.5 км, вытянутое в северо-восточном направлении согласно со складчатой структурой региона. Контакты с породами вмещающей рамы тектонические, что подтверждается наличием тектонических клиньев кристаллических сланцев в зонах экзоконтакта и тесно связанных с ними отторженцев ультрамафитов (Гончаренко А. И., 1989). Вмещающие породы относятся к кускунугской свите (V-$Є_1$) и представлены кристаллическими сланцами с прослоями известняков, кремнистых и терригенных пород (Агафонов и др., 1993).

Массив сложен главным образом породами дунит-гарцбургитового полосчатого комплекса. В эндоконтактовых частях они замещаются серпентинитами, среди которых отмечаются тела клинопироксенитов. Наряду с ультрамафитами в массиве присутствуют небольшие дайко- и штокообразные тела габбро-диабазов и диабазов, которые нередко превращены в родингиты (Агафонов и др., 2005). Ультрамафиты исследуемого объекта претерпели интенсивные пластические деформации и постоянно обнаруживают признаки метаморфических пород.

В Агардагском массиве выявлено большое количество (более 100) хромитовых проявлений (Агафонов и др., 1993; Агафонов и др., 2005). Они образуют линзовидные, полосчатые и шлировидные тела. Проявления хромититов, как правило, приурочены к полям развития дунитов.

Методика исследования. Анализ вещественного состава уваровита проводился методом рентгеноспектрального микроанализа (Reed, 2005) 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 (г. Томск), аналитик А. Е. Марфин. Для этого из отобранных образцов ультрамафитов были изготовлены плоскопараллельные аншлифы толщиной 3—4 мм по рекомендуемым методикам (Taylor, Radtke, 1965; Reed, 2005). Перед проведением анализов на исследуемые поверхности предварительно напыляли слой углерода толщиной 25—30 нм. Последующие расчеты химических составов проводились по программе INCA-Issue 18b.

Получение качественных микрофотографий кристаллов уваровита в высоком вакууме выполнено на растровом электронном микроскопе TESCAN Vega 3 SBH в ИФПМ СО РАН (г. Томск), аналитик А. С. Кульков.

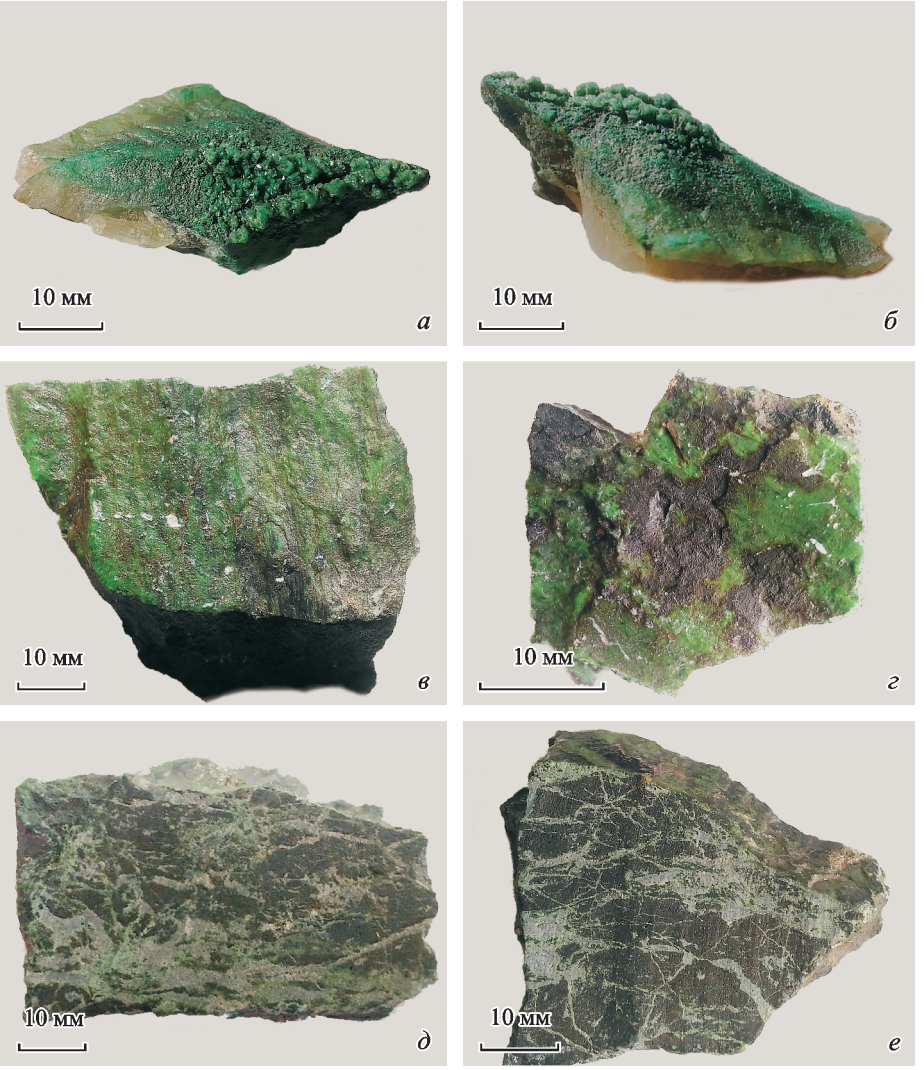

Рис. 1. Уваровитовый гранат из хромититов Агардагского массива.

а, *б* — кристаллические друзы в ассоциации с кальцитом; *в* — уваровит-кальцитовая кристаллическая корочка на поверхности обломка хромитита; *г* — ксеноморфные выделения вокруг зерен хромшпинелидов; *д*, *е* — агрегативные выделения по трещинкам дробления совместно с серпентином и хромсодержащим хлоритом.

Fig. 1. Uvarovite garnet from chromitites of Agardag massif: *а*, *б* — druses of crystals; *в* — uvarovite-calcite crust on a chromitite fragment; *г* — xenomorphic segregations; *д*, *е* — segregations along fractures.

Положение уваровитовых жил. Отмечено, что в Агардагском массиве уваровитовые гранаты локализуются только в хромитовых пластах. При этом максимальное развитие жил с уваровитом наблюдается в наиболее тектонизированных частях массива, где хромитовые тела испытали активное дробление и дезинтеграцию их отдельных кристаллокластов.

Минерал отмечается как в виде кристаллических форм, так и в виде тонкозернистых агрегатов в тесной ассоциации с кальцитом, серпентином и хромсодержащим хлоритом. В первом случае уваровитовые гранаты наблюдаются среди зон дробления хромититов, где в «сухих» (полых) трещинах об-

разуют или сплошную «сыпь» мелких кристалликов или отдельные разобщенные кристаллы до 4—5 мм. Цвет их изменяется от зеленого до густо зеленого со стеклянным блеском. Нередко вместе с уваровитом в таких полостях обнаруживается кальцит в виде кристаллических корочек или редко рассеянных кристалликов (рис. 1 *а*, *б*).

Более обычно развитие тонкозернистого зеленого уваровита в кальцитовом цементе в виде кристаллических корочек на обломках хромититов или в виде ксеноморфных выделений вокруг зерен хромшпинелидов (рис. 1 *в*, *г*). Часто уваровитовые тонкозернистые агрегаты совместно с серпентином и хромсодержащим хлоритом «залечивают» многочисленные мелкие (мощность до 0.5 см, длина — до нескольких десятков сантиметров) трещинки в хромититах зон тектонического дробления рудных линз (рис. 1, *д*, *е*). По цвету выделяются разновидности от светло-зеленых до травяно- и изумрудно-зеленых. Блеск изменяется от стеклянного до тусклого и матового.

В коре выветривания уваровит устойчив, замещение его другими минералами не обнаруживается. Он только дезинтегрируется, переходя в тонкозернистый агрегат зеленого цвета с твердостью около 3, рентгеноспектральный анализ которого показывает преобладающие линии уваровита.

Характеристика и свойства уваровита. Размер отдельных раскристаллизованных индивидов изученного минерала изменяется от 0.1 до 5 мм, обычно — 1—3 мм. Между зернами наблюдаются индукционные грани. По цвету выделяются разновидности от светло-зеленых до изумрудно- и темнозеленых. В некоторых зернах окраска зональная. Уваровитовые гранаты прозрачные, но чаще мутноватые или мутные, блеск — от стеклянного до матового.

Преобладают кристаллы ромбододекаэдрического (?) облика с неравномерным развитием различных граней. На гранях кристаллов нередко обнаруживаются тонкие коррозионные структуры, что, очевидно, является признаком растворения (рис. 2).

Химический состав агардагского уваровита оценен на основе 15 оригинальных химических анализов, в которых обнаруживается непостоянное либо низкое содержание магния и практически полное отсутствие титана. Последний факт отличает агардагский уваровит от уваровита Сарановского (Средний Урал) и Длинногорского (Корякия) ультрамафитовых массивов, для которых ранее было установлено постоянное присутствие до 2 % TiO_2 (Иванов, Бушмакин, 1998; Осипенко и др., 2001). Отличием от данных массивов будет также и более высокое содержание железа в уваровите из Агардагского массива.

Составы изученных уваровитовых гранатов можно охарактеризовать как весьма разнообразные твердые растворы и смеси основных их кристаллохимических разновидностей, различающихся главным образом по набору катионов — уваровита (Ca, Cr), андрадита (Ca, Fe) и гроссуляра (Ca, Al). При этом доля доминирующего уваровитового минала в них варьирует от 52 до 68 мол. %.

По уменьшению доли минала в составе проанализированные известково-хромистые гранаты можно разделить на три разновидности: уваровит—гроссуляр (Ув-Гр), уваровит—гроссуляр—андрадит (Ув-Гр-Анд) и уваровит—андрадит—гроссуляр (Ув-Анд-Гр) (см таблицу). Уваровит—гроссуляр—андрадит характеризуется наибольшей долей уваровитового минала (до 68.2 %) при наименьших долях других миналов. Доля андрадитового минала возрас-

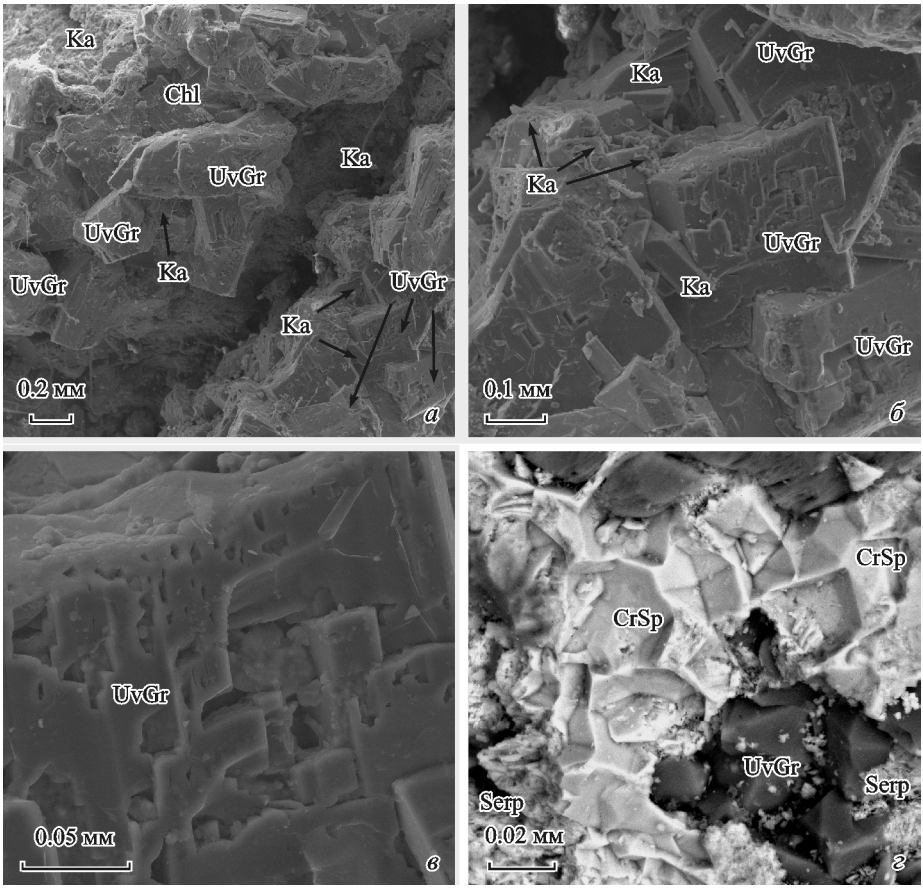

Рис. 2. Микрофотографии кристаллов уваровита в высоком вакууме (режим SE) из хромититов реститовых ультрамафитов Агардагского массива.

UvGr — уваровитовый гранат; Ka — кальцит; Chl — хромсодержащий хлорит; Serp — серпентин; CrSp — хромшпинелид.

Fig. 2. Microphotographs of uvarovite crystals under high vacuum (SE regime): crystals from chromitites of restite ultramafites of Agardag massif. UvGr — uvarovite garnet; Ka — calcite; Chl — chromium-bearing chlorite; Serp — serpentine; CrSp — chromospinelide.

тает в выделенном ряду разновидностей слева направо от уваровит—гроссуляра к уваровит—андрадит—гроссуляру, где андрадит выходит на второе место (рис. 3).

Наблюдения показывают в ряду от уваровит—гроссуляров к уваровит—гроссуляр—андрадитам существование обратной зависимости между содержанием хрома и алюминия, железа и алюминия и прямой зависимости между содержанием хрома и железа (рис. 4). В ряду от уваровит—гроссуляр—андрадитов к уваровит—андрадит—гроссулярам происходит возрастание содержания железа при уменьшении содержания хрома. Это, очевидно, свидетельствует о присутствии изоморфного замещения типа $Al^{3+} \rightarrow Cr^{3+} + Fe^{3+} \rightarrow Fe^{3+}$. Подобный изоморфизм под воздействием процессов метаморфизма характерен для хромшпинелидов и неоднократно отмечался при исследованиях эволюции их вещественного состава (Макеев, 1992; Перевозчиков и др., 2007; Юричев, 2015b, 2016).

Химический состав (мас. %) уваровитовых гранатов из хромититов Агардагского массива

Chemical compositions (wt %) of uvarovite garnets from chromitites of Agardag massif

Минерал	Образец	Химический состав, мас. %								Миналы, %					Кристаллохимическая формула
		MgO	Al_2O_3	SiO_2	CaO	Cr_2O_3	FeO	Fe_2O_3	TiO_2	Ca_3Cr_2	Ca_3Fe_2	Ca_3Al_2	Mg_3Al_2	Fe_3Al_2	
Ув-Гр	1.1-1	1.41	8.35	37.37	33.15	17.88	—	1.84	—	56.4	5.5	32.5	5.6	—	$(Ca_{2.83}Mg_{0.17})_{3.00}(Cr_{1.13} \cdot Al_{0.78}Fe_{0.11})_{2.02}[Si_{2.98}O_{12}]$
	1.1-2	1.44	6.86	36.74	33.73	19.15	—	2.09	—	59.3	6.12	28.9	5.6	—	$(Ca_{2.90}Mg_{0.17})_{3.07}(Cr_{1.21} \cdot Al_{0.65}Fe_{0.13})_{1.99}[Si_{2.94}O_{12}]$
	1.1-3	0.54	7.51	36.99	34.56	19.12	—	1.34	—	60.5	4.0	33.3	2.1	—	$(Ca_{2.97}Mg_{0.06})_{3.03}(Cr_{1.21} \cdot Al_{0.71}Fe_{0.08})_{2.00}[Si_{2.97}O_{12}]$
	1.2-1	—	7.88	37.52	33.82	18.56	1.32	0.90	—	59.1	2.7	35.5	—	2.7	$(Ca_{2.92}Fe_{0.08})_{3.00}(Cr_{1.18} \cdot Al_{0.75}Fe_{0.05})_{1.98}[Si_{3.02}O_{12}]$
	1.2-3	—	8.05	37.26	34.54	18.86	0.50	0.79	—	59.8	2.4	36.8	—	1.0	$(Ca_{2.97}Fe_{0.03})_{3.00}(Cr_{1.20} \cdot Al_{0.76}Fe_{0.05})_{2.01}[Si_{2.99}O_{12}]$
	1.3-1	—	8.49	37.15	35.17	17.38	—	1.82	—	54.7	5.4	39.8	—	—	$Ca_{3.01}(Cr_{1.10}Al_{0.80}Fe_{0.11})_{2.01} \cdot [Si_{2.98}O_{12}]$
	1.3-2	—	7.48	36.96	35.07	18.56	—	1.97	—	58.6	5.9	35.5	—	—	$Ca_{3.02}(Cr_{1.18}Al_{0.71}Fe_{0.12})_{2.01} \cdot [Si_{2.97}O_{12}]$
	1.5-1	—	7.64	37.25	34.79	17.14	—	3.17	—	54.5	9.6	35.9	—	—	$Ca_{3.00}(Cr_{1.09}Al_{0.72}Fe_{0.19})_{2.01} \cdot [Si_{3.00}O_{12}]$
	1.5-3	—	6.65	37.12	34.26	18.49	0.49	2.99	—	59.1	9.1	30.8	—	1.0	$(Ca_{2.97}Fe_{0.03})_{3.00}(Cr_{1.18} \cdot Al_{0.63}Fe_{0.18})_{2.00}[Si_{3.00}O_{12}]$
	Среднее (9)	*1.13*	7.66	37.15	34.34	18.35	*0.77*	1.88	—	58.0	5.7	34.3	*1.5*	*1.6*	
Ув-Гр-Анд	1.4-1	1.70	4.23	36.18	32.70	20.33	—	4.86	—	64.2	14.6	14.5	6.7	—	$(Ca_{2.85}Mg_{0.21})_{3.05}(Cr_{1.31} \cdot Al_{0.40}Fe_{0.30})_{2.01}[Si_{2.94}O_{12}]$
	1.4-2	0.53	3.66	35.95	33.84	21.31	—	4.71	—	68.2	14.3	15.3	2.1	—	$(Ca_{2.97}Mg_{0.06})_{3.03}(Cr_{1.38} \cdot Al_{0.35}Fe_{0.29})_{2.02}[Si_{2.94}O_{12}]$
	1.4-3	0.54	3.27	35.77	34.40	20.96	—	5.05	—	66.0	15.1	16.7	2.1	—	$(Ca_{3.02}Mg_{0.07})_{3.09}(Cr_{1.36} \cdot Al_{0.32}Fe_{0.31})_{1.98}[Si_{2.93}O_{12}]$
	1.5-2	—	5.31	36.36	34.48	19.13	—	4.73	—	61.4	14.5	24.1	—	—	$Ca_{3.01}(Cr_{1.23}Al_{0.51}Fe_{0.29})_{2.03} \cdot [Si_{2.96}O_{12}]$
	Среднее (4)	*0.92*	4.12	36.07	33.86	20.43	—	4.84	—	64.9	14.6	17.7	*3.7*	—	

Ув-Анд-Гр	2-1	—	4.88	36.66	34.03	15.92	0.32	8.13	—	51.4	25.0	22.9	—	0.7	$(Ca_{2.98}Fe_{0.02})_{3.00}(Cr_{1.04} \cdot Al_{0.46}Fe_{0.50})_{2.00}[Si_{3.00}O_{12}]$
	2-2	—	5.01	36.52	33.41	16.12	0.97	7.96	—	52.3	24.6	21.1	—	2.0	$(Ca_{2.94}Fe_{0.06})_{3.00}(Cr_{1.05} \cdot Al_{0.46}Fe_{0.49})_{2.00}[Si_{3.00}O_{12}]$
	Среднее (2)	—	4.94	36.59	33.72	16.02	0.65	8.05	—	51.9	24.8	22.0	—	1.3	
Химический состав уваровита из реститовых ультрамафитов															
Длинногорский массив (п-ов Валижген, Корякия)															
	Среднее (7)	0.30	7.38	37.53	34.37	17.11	1.79	0.09	1.60	56.67	5.63	36.39	1.26	*0.20*	$(Ca_{2.96}Mg_{0.04})_{2.99}(Cr_{1.09} \cdot Al_{0.70}Fe_{0.11}Ti_{0.10})_{1.99} \cdot [Si_{3.01}O_{12}]$
Сарановский массив (Средний Урал)															
	Среднее (23)	0.17	6.44	37.80	34.52	19.41		0.30	1.03	65.00	1.00	33.64	0.67		$(Ca_{2.99}Mg_{0.03})_{3.01}(Cr_{1.24} \cdot Al_{0.61}Fe_{0.02}Ti_{0.06})_{1.94} \cdot [Si_{3.06}O_{12}]$

Примечание. Определение химического состава осуществлялось 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» Томского государственного университета (г. Томск), оператор А. Е. Марфин. Цифры, указанные курсивом, — элемент отмечается не повсеместно. Цифры в скобках — количество проанализированных образцов. Анализы уваровитовых гранатов Длинногорского и Сарановского ультрамафитовых массивов заимствованы из литературных источников (Иванов, Бушмакин, 1998; Осипенко и др., 2001).

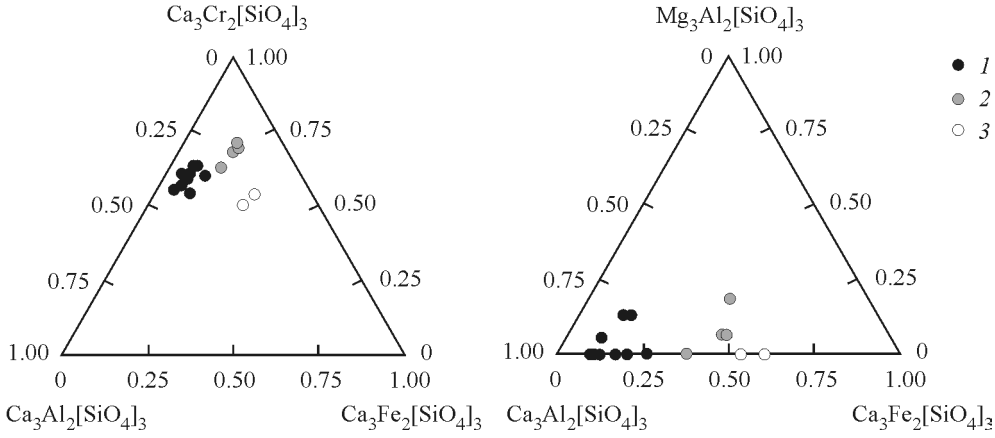

Рис. 3. Тройные диаграммы для составов уваровитовых гранатов Агардагского массива.

1 — уваровит—гроссуляр; *2* — уваровит—гроссуляр—андрадит; *3* — уваровит—андрадит—гроссуляр.

Fig. 3. Triple diagrams for composition of uvarovite garnets in Agardag massif: *1* — uvarovite—grossular; *2* — uvarovite—grossular—andradite; *3* — uvarovite—andradite—grossular.

Исключая особенности химического состава, морфологических и минералогических отличительных признаков между выделенными разновидностями уваровитовых гранатов не наблюдается.

О генезисе уваровитовых гранатов. По мнению авторов, выявленный среди хромититов уваровит Агардагского массива имеет эпимагматический гидротермальный генезис. При этом вся гидротермальная минерализация месторождения, в том числе и уваровитовая, связывается с воздействием на хромиты гидротерм, образованных в результате прогрева поровых вод вмещающих пород более поздними интрузиями основного-среднего состава. Воды, имеющие преимущественно кальциево-карбонатный состав, при взаи-

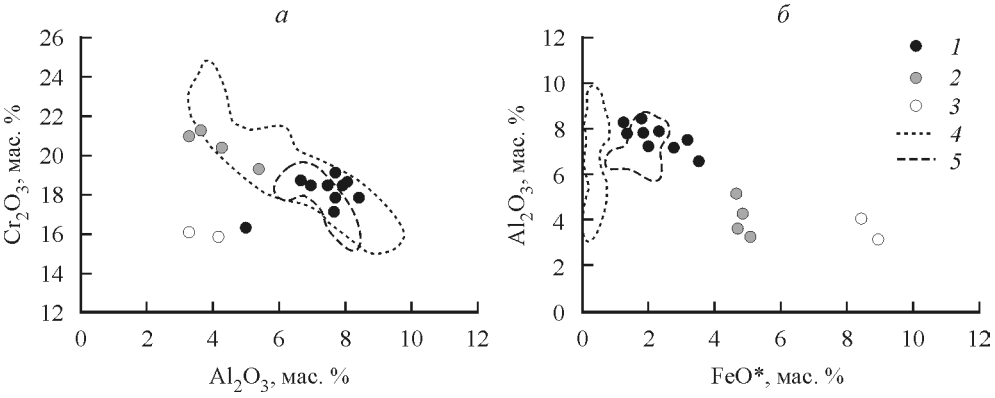

Рис. 4. Бинарные диаграммы для химических составов выделенных разновидностей уваровитовых гранатов (*а*, *б*) Агардагского массива.

1 — уваровит—гроссуляр; *2* — уваровит—гроссуляр—андрадит; *3* — уваровит—андрадит—гроссуляр; *4* — поле уваровитовых гранатов из ультрамафитов Длинногорского массива, Корякия (Осипенко и др., 2001); *5* — поле уваровитовых гранатов Сарановского ультрамафитового массива, Средний Урал (Иванов, Бушмакин, 1998).

Fig. 4. Binary diagrams for chemical compositions of selected joins of uvarovite garnets from Agardag massif (*1*—*3*), Dlinnogorsky (*4*) and Saranovsky (*5*) ultramafic massifs.

модействии с хромитовым субстратом приводили к образованию минералов, состоящих из компонентов субстрата и гидротерм — уваровитовых гранатов и хлоритов с повышенным содержанием хрома. При этом в уваровите Ca является привнесенным компонентом гидротерм, а Cr, Al, Mg и Fe — компонентами из хромшпинелидов. Известно, что Cr в гидротермальном процессе имеет повышенную инертность, что обусловливает отсутствие его выноса за пределы хромитовых линз и локальное перераспределение. Данное обстоятельство хорошо объясняет тяготение уваровитовых гранатов к хромититам и их отсутствие в породах с вкрапленной хромитовой минерализацией, где гидротермы обогащены компонентами серпентинитов.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

1. Среди хромититов Агардагского ультрамафитового массива Южной Тывы выявлены и впервые детально описаны уваровитовые гранаты. Охарактеризованы и представлены микрофотографии их кристаллических и агрегативных образований. По уменьшению доли минала в химическом составе среди проанализированных известково-хромистых гранатов авторами выделены три разновидности: уваровит—гроссуляр, уваровит—гроссуляр—андрадит и уваровит—андрадит—гроссуляр.

2. Все проанализированные уваровитовые гранаты по ведущим миналам в составе можно разделить на две группы: уваровит-гроссуляровую и уваровит-андрадитовую при доминирующей роли в породах массива первой. Ранее в результате изучения уваровита из ультрамафитов офиолитовых комплексов Урала было сделано предположение, что данные разновидности граната типоморфны разным типам хромовых руд (Макеев, 1992). Уваровит—андрадит встречается в хромитовых высокохромистых и метаморфизованных высокожелезистых хромовых рудах, а уваровит—гроссуляр — только в высокоглиноземистых и умеренноглиноземистых хромовых рудах, сложенных алюмохромитом и хромпикотитом. Учитывая, что уваровит—гроссуляр доминирует в хромититах Агардагского массива, а в составе проанализированных ранее хромшпинелидов массива высокую роль играют алюмохромиты (Юричев и др, 2013; Юричев, 2015а), данное предположение находит свое подтверждение для реститовых ультрамафитов Тывы и позволяет использовать состав уваровитовых гранатов как индикатор качества хромитовых руд. Также к настоящему времени составы хромсодержащих гранатов наряду с ассоциирующими шпинелями могут применяться в качестве индикаторов *P-T* условий формирования вмещающих их ультрамафитов (Turkin, Sobolev, 2009; Туркин, 2011).

3. По своему вещественному составу доминирующие в хромититах Агардагского массива гранаты уваровит-гроссуляровой специализации обнаруживают достаточно близкий состав с уваровитовыми гранатами Сарановского (Средний Урал) и Длинногорского (Корякия) ультрамафитовых массивов, но отличаются от них несколько большей железистостью и полным отсутствием в составе титана. Данное обстоятельство, очевидно, обусловлено спецификой сосуществующих хромшпинелидов, из которых под воздействием гидротерм и происходил вынос данных компонентов.

4. По генезису изученные уваровитовые гранаты относятся к апоультрамафитовым гидротермальным образованиям, что подтверждается их типо-

морфными особенностями, минеральным парагенезисом, а также постоянно отмечаемыми структурами растворения на гранях кристаллов.

Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки РФ (проект 5.2352.2017/ПЧ).

Список литературы

Агафонов Л. В., *Лхамсурэн Ж.*, *Кужугет К. С.*, *Ойдуп Ч. К.* Платиноносность ультрамафит-мафитов Монголии и Тувы. Улаанбаатар: Монгольский государственный университет науки и технологии, **2005.** 224 с.

Агафонов Л. В., *Кужугет К. С.*, *Ойдуп Ч. К.*, *Ступаков С. И.* Самородные металлы в гиперабазит-базитах Тувы. Новосибирск: Объединенный институт геологии, геофизики и минералогии СО РАН, **1993.** 86 с.

Гончаренко А. И. Деформация и петроструктурная эволюция альпинотипных гипербазитов. Томск: Изд-во Том. ун-та, **1989.** 404 с.

Жданова Л. Р., *Астахова И. С.* Коллекционное сырье северо-востока Европейской части России / Геммология. Томск: Томский ЦНТИ, **2009.** С. 20—26.

Иванов О. К., *Бушмакин А. Ф.* Уваровит Сарановского хромитового месторождения // Уральский геологический журнал. **1998.** № 1. С. 3—18.

Козаков И. К., *Ковач В. П.*, *Ярмолюк В. В.*, *Котов А. Б.*, *Сальникова Е. Б.*, *Загорная Н. Ю.* Корообразующие процессы в геологическом развитии Тувино-Монгольского массива: Sm-Nd изотопные и геохимические данные по гранитоидам // Петрология. **2003.** Т. 11. № 5. С. 491—511.

Макеев А. Б. Минералогия альпинотипных ультрабазитов Урала. СПб.: Наука, **1992.** 197 с.

Осипенко А. Б., *Сидоров Е. Г.*, *Осипенко Л. Г.*, *Гриб Е. Н.* Хромсодержащие гранаты из родингитов Длинногорского базит-гипербазитового массива, п-ов Валижген, Корякия // ЗВМО. **2001.** № 1. С. 72—80.

Перевозчиков Б. В., *Плотников А. В.*, *Макиев Т. Т.* Природа вариаций состава рудной и акцессорной хромшпинели ультрабазитового массива Сыум-Кеу (Полярный Урал) // Известия вузов. Геология и разведка. **2007.** № 4. С. 32—39.

Савельева Г. Н., *Белокрыс А. М.* Хромиты — руда, рожденная в мантии Земли // Природа. **2012.** № 11. С. 14—23.

Туркин А. И. Хромсодержащие гранаты и шпинелиды как минералы-индикаторы *P-T* условий формирования перидотитов (экспериментальное исследование). Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. Новосибирск: ИГМ СО РАН, **2011.** 33 с.

Юричев А. Н. Критерии регионального и локального прогнозирования потенциальной хромитоносности подиформных ультрамафитовых массивов складчатых областей // Руды и металлы. **2016.** № 3. С. 5—14.

Юричев А. Н. Минералого-химические особенности хромшпинелидов Агардагского ультрамафитового массива (ЮВ Тыва) // Вопросы естествознания. **2015а.** № 4 (8). С. 138—142.

Юричев А. Н. Калнинский ультрамафитовый массив Западного Саяна: рудная минерализация и ее генетическая природа // Известия Томского политехнического университета. **2015б.** Т. 326. № 2. С. 61—69.

Юричев А. Н., *Чернышов А. И.*, *Кульков А. С.* Рудная минерализация Агардагского ультрамафитового массива (Республика Тыва) // Известия Томского политехнического университета. **2013.** Т. 323. № 1. С. 130—136.

Юшкин Н. П., *Иванов О. К.*, *Попов В. А.* Введение в топоминералогию Урала. М.: Наука, **1986**. 294 с.

References

Agafonov L. V., *Kuzhuget K. S.*, *Oidup Ch. K.*, *Stupakov S. I.* Native metals in ultrabasite-basites of Tuva. Novosibirsk: Joint Institute of Geology, Geophysics and Mineralogy, SB RAS, **1993.** 86 p. (*in Russian*).

Agafonov L. V., *Lhamsuren J.*, *Kuzhuget K. S.*, *Oidup Ch. K.* Platinum-bearing capacity of ultramafite-mafites of Mongolia and Tuva. Ulaanbaatar: Mongolian State University of Science and Technology, **2005.** 224 p. (*in Russian*).

Goncharenko A. I. Deformation and petrostructural evolution of alpinotypic hyperbasites. Tomsk: Tomsk University, **1989.** 404 p. (*in Russian*).

Ivanov O. K., *Bushmakin A. F.* Uvarovite of the Saranovsky chromite deposit. *Uralian Geol. J.* **1998.** N 1. P. 3—18 (*in Russian*).

Kozakov I. K., *Kovach V. P.*, *Yarmolyuk V. V.*, *Kotov A. B.*, *Salnikova E. B.*, *Zagornaya N. Yu.* Crust-forming processes in the geologic development of the Tuva-Mongolia massif: Sm-Nd isotopic and geochemical data for granitoids. *Petrology.* **2003.** Vol. 11. N 5. P. 444—463.

Makeev A. B. Mineralogy alpinotypic ultrabasites of the Urals. Saint Peterburg: Nauka, **1992.** 197 p. (*in Russian*).

Osipenko A. B., *Sidorov E. G.*, *Osipenko L. G.*, *Grib E. N.* Chromium-containing garnets from rodingites of the Dlinnogorsky basite-ultrabasite massif, Valizhgen peninsula, Koryakia. *Zapiski RMO* (*Proc. Russian Miner. Soc.*). **2001.** N 1. P. 72—80 (*in Russian*).

Perevozchikov B. V., *Plotnikov A. V.*, *Makiev T. T.* Nature of variations in composition of ore and accessory chromespinels of ultramafic massif Syum-Keu (Polar Urals). *Proc. of Higher Schools. Geology and Exploration.* **2007.** N 4. P. 32—39 (*in Russian*).

Pfander J. A., *Jochum K. P.*, *Kozakov I.*, *Kroner A.*, *Wolfgang T.* Coupled evolution of back-arc and island arc-like mafic crust in the late-Neoproterozoic Agardagh Tes-Chem ophiolite, Central Asia: evidence from trace element and Sr-Nd-Pb isotope data. *Contrib. Miner. Petrol.* **2002.** Vol. 143. P. 154—174.

Reed S. J. B. Electron microprobe analysis and scanning electron microscopy in geology. N. Y.: Cambridge University Press, **2005.** 189 p.

Savelyeva G. N., *Belokrys A. M.* Chromites — ore, born in the Earth's mantle. *Priroda.* **2012.** N 11. P. 14—23 (*in Russian*).

Taylor C. M., *Radtke A. S.* Preparation and polishing of ores and mill products for microscopic examination and electron microprobe analysis. *Econ. Geol.* **1965.** N 65. P. 1306—1319.

Turkin A. I. Chromium-containing garnets and spinels as minerals-indicators of *P-T* conditions of formation of peridotites (experimental study): author's abstract of dis. ... doctor of geol.-miner. sciences. Novosibirsk: IGM SB RAS, **2011.** 33 p. (*in Russian*).

Turkin A. I., *Sobolev N. V.* Pyrope-knorringite garnets: overview of experimental data and natural parageneses. *Russian Geol. Geophys.* **2009.** Vol. 50. N 12. P. 1169—1182.

Yurichev A. N. Criteria of regional and local prediction of chromite-ore in podiformic ultramafic massifs of folded regions. *Ores and Metals.* **2016.** N 3. P. 5—14 (*in Russian*).

Yurichev A. N. Kalninsky ultramafic massif of the Western Sayan: ore mineralization and its genetic nature. *Bull. Tomsk Polytechnic University.* **2015b.** Vol. 326. N 2. P. 61—69 (*in Russian*).

Yurichev A. N. Mineralogical and chemical features of chromospinelides of the Agardag ultramafic massif (South-Eastern Tyva). *Questions of natural science.* **2015a.** N 4 (8). P. 138—142 (*in Russian*).

Yurichev A. N., *Chernyshov A. I.*, *Kulkov A. S.* Ore mineralization of Agardag ultramafic massif (Republic of Tuva). *Bull. Tomsk Polytechnic University.* **2013.** Vol. 323. N 1. P. 130—136 (*in Russian*).

Yushkin N. P., *Ivanov O. K.*, *Popov V. A.* Introduction to topomineralogy of the Urals. Moscow: Nauka, **1986.** 294 p. (*in Russian*).

Zhdanova L. R., *Astakhova I. S.* Collectional raw materials of north-east of European part of Russia. In: *Gemmology*. Tomsk: Tomsk CNTI, **2009.** P. 20—26 (*in Russian*).

Поступила в редакцию
13 апреля 2017 г.