

УДК 553.461:553.08

МЕТАМОРФИЗМ И ТЕКТОНИКА: РОЛЬ В СТРУКТУРНО-ВЕЩЕСТВЕННОМ ПРЕОБРАЗОВАНИИ ХРОМШПИНЕЛИДОВ ИЗ УЛЬТРАМАФИТОВ

Юричев Алексей Николаевич,

juratur@sibmail.com

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

Актуальность работы обусловлена необходимостью выделения новых локальных критериев оценки в ультрамафитовых массивах офиолитовых комплексов потенциального хромитового оруденения, являющегося в настоящее время остродефицитным сырьем для России.

Цель работы: оценка характера воздействия регрессивного метаморфизма и пострудной тектоники на морфологическую сохранность хромитового рудного тела и его вещественный состав с целью последующего прогнозирования качества ожидаемого оруденения.

Методы исследования: изучение силикатных и рудных минералов в прозрачных шлифах и аншлифах на поляризационном микроскопе AxioScope Carl Zeiss; оценка химического состава хромшпинелидов 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.

Результаты. Критерии сохранности хромитового оруденения и его качественного состава определяются характером пострудных процессов метасоматизма и тектоники. Прогнозирование качества ожидаемого хромитового оруденения возможно только при одновременной оценке двух этих преобразующих агентов. Метасоматизм рудных хромшпинелидов обусловлен кинетическим фактором, выражающимся в снижении воздействия метаморфогенных процессов при увеличении густоты вкрапленности хромитового оруденения и размеров рудных тел. Густовкрапленные и сливные руды, целостность которых не нарушена тектоническим воздействием, практически полностью сохраняют свой качественный состав и промышленные свойства при любых степенях проявления метасоматизма. В противном случае происходит будинаж рудных тел, образование мелких разрозненных линз, раскалывание и дробление отдельных зерен и, как следствие всего этого, увеличение интенсивности их метаморфогенного преобразования (вынос Al, Mg и Cr и накопление Mn и Fe³⁺), вплоть до полной потери их промышленной ценности.

Ключевые слова:

Офиолиты, ультрамафиты, хромшпинелиды, метаморфизм, тектоника, химизм, структурные особенности.

Введение

Хром – необходимый компонент легированных сталей, которому нет замены. Добавка хрома к сталям придает им вязкость, повышает твердость и сообщает им антикоррозионные свойства. Хром дает ценные сплавы с никелем, кобальтом, алюминием, вольфрамом, молибденом (стеллиты). Большое значение имеет хромирование, т. е. покрытие тонким слоем хрома различных металлических изделий в целях борьбы с коррозией.

Объективно складывающиеся исторические события последних нескольких десятилетий привели к тому, что Россия лишилась большей части собственной хромовой рудно-сырьевой базы. До середины 90-х гг. прошлого века потребности черной металлургии в хромоворудном сырье удовлетворялись за счет поставок высококачественных руд Донского ГОКа Кемпирсайской группы месторождений (Южный Урал), однако после распада СССР данные месторождения территориально отошли Казахстану.

На сегодняшний день действующими являются предприятия, работающие на месторождениях Пермского края, – Главное Сарановское и Южно-Сарановское (Средний Урал), а также Ямало-Ненецкого автономного округа – месторождение Центральное (Полярный Урал). Однако добываемое хромоворудное сырье на данных месторождения не покрывает даже 1/10 части необходимой потребности ферросплавных заводов государства,

а минерально-сырьевая база хромоворудного сырья страны имеет тенденцию к устойчивому сокращению. Являясь одним из основных производителей и экспортеров феррохрома, Россия стала полностью зависимой от импорта, закупая основную часть сырья для его производства за рубежом, в основном в Казахстане и Турции.

Острая нехватка дефицитного стратегического сырья способствовала активизации в последние несколько десятилетий геологоразведочных работ на хром в России, а также разработке новых прогнозных критериев его поиска и оценки.

Выявление положения, прогнозирование размеров, морфологии и химического состава рудных тел в массивах конкретных формаций определяется локальными критериями прогноза, основанными на структурных, петрографических, петрохимических и минералогических особенностях данных массивов. В исследованиях нескольких последних десятилетий по вопросам хромитоносности ультрамафитов из офиолитовых комплексов неоднократно отмечалось, что химический состав хромшпинелидов подвержен закономерным изменениям в зависимости от размеров зерен и густоты их вкрапленности, а также характера пострудных процессов, затронувших массив ультрамафитов [1–6]. К таким пострудным преобразующим агентам относятся, в первую очередь, метаморфизм и тектоническое дробление.

С.В. Москалева [1] в своих исследованиях неоднократно рассматривала данные агенты в качестве главных факторов прогноза хромитонности территории, основываясь на том, что при интенсивном проявлении хотя бы одного из этих факторов хромовые руды разубоживаются и уничтожаются. Однако проведенные позднее исследования [2, 6–10] и результаты авторских наблюдений не позволяют категорично согласиться с таким выводом.

Исследование изменения состава хромшпинелидов от «свежих» образцов к полностью преобразованным, а также изучение зональных зерен шпинелидов ранее позволили проследить две эволюционные стадии их преобразования [3–7]. Первая стадия связана с высокобарическим динамометаморфизмом и включает в себя процессы деформаций, скупивания океанической литосферы и ее аккреции на пассивную окраину континента, в результате чего происходит формирование крупных тектонических пластин, распространение складчато-надвиговых и шарьяжных дислокаций, линейных зон высокобарического метаморфизма. На данной стадии происходит вынос из шпинелидов Al и Mg и накопление Cr, Fe и Mn.

В результате выноса из рудных хромшпинелидов магния и значительного количества алюминия увеличивается их железистость и хромистость. Содержание хрома в метаморфизованных хромшпинелидах может увеличиваться до 15 мас. % и достигать в рудах глиноземистого типа до 57 мас. %, а в рудах высокохромистого типа – до 64 мас. %. Таким образом, на первой стадии происходит естественное «облагораживание» хромшпинелидов. Развитие такого механизма «облагораживания» получило подтверждение экспериментальными исследованиями [11, 12], а также находками минералов высоких и сверхвысоких давлений (алмаз, карбиды кремния, псевдоморфы октаэдрического оливина, корунд, циркон, гранат и др.) в хромититах ультрамафитовых массивов Полярного Урала [13, 14].

Вторая стадия связана с наложенными метаморфическими процессами и приводит к преобразованию, перекристаллизации хромшпинелидов с выносом из них Al, Mg и Cr при накоплении Mn и окислении закисного железа в окисное. Качество (определяется содержаниями Cr_2O_3 , $FeO^* = FeO + 0,9 \times Fe_2O_3$ и SiO_2) вкрапленных хромовых руд ухудшается вследствие образования на месте хромита его железистых разновидностей (феррохромит, хроммагнетит) и хлорита, вплоть до полной потери их промышленной ценности.

Однако вопрос тождественности степени воздействия наложенных эпигенетических процессов на акцессорные и рудные хромшпинелиды, а также оценка факторов, отвечающих за интенсивность преобразования их химических составов, освещены в геологической литературе неоднозначно и остаются дискуссионными.

В настоящей статье представлены авторские наблюдения по данному вопросу.

Метаморфизм и тектоника

Метаморфизм. Широко проявлен в ультрамафитах офиолитовых комплексов. Последовательность метаморфизма, накладывающегося на деформированные в сухих условиях ультрамафиты, трактуется разными авторами неоднозначно. И.С. Чащухин считает, что вторичные преобразования реститовых ультрамафитов связаны как с ранней регрессивной, так и поздней наложенной прогрессивно-регрессивной стадиями метаморфизма. При этом регрессивная гидратация протекает в восстановительных условиях, начинаясь тремолитизацией и заканчивая ранней петельчатой серпентинизацией, а прогрессивный метаморфизм происходит в окислительных условиях с дальнейшими этапами серпентинизации вплоть до полного замещения оливина и энстатита серпентином [15]. Альтернативная точка зрения, сформулированная В.Н. Пучковым и Н.В. Вахрушевой, предполагает проявление единого непрерывного регрессивного этапа метаморфизма, завершающегося петельчатой серпентинизацией [15, 16].

Для оценки воздействия эпигенетических процессов на химический состав хромшпинелидов были отобраны и изучены «свежие» и интенсивно серпентинизированные образцы ультрамафитов с акцессорной и рудной минерализацией (таблица). Для прослеживания изменения качественного состава сливных руд образцы последних выбирались из линз, расположенных среди неизмененных (слабо измененных) дунитов и серпентинитов.

Полученные результаты позволяют отметить, что химический состав акцессорных хромшпинелидов и бедновкрапленных руд под воздействием вторичных процессов достаточно интенсивно изменяется путем выноса из них Al, Mg и Cr при накоплении Fe^{3+} и Mn, вплоть до полного образования на их месте магнетит-хлоритового агрегата. Однако при увеличении густоты вкрапленности, начиная со средневкрапленных руд, степень преобразования химического состава хромшпинелей существенно понижается и выражается в приобретении зернами в краевых частях узких хроммагнетитовых (магнетитовых) кайм, мощность которых может возрастать при увеличении интенсивности воздействия вторичного процесса или числа стадий такого воздействия (рис. 1). Отмечено, что для одинаковых по густоте вкрапленности хромититов степень преобразования зерен будет определяться их гранулометрией: чем крупнее размерность зерен хромшпинелидов, тем больше сохраняется полезной неизменной центральной части зерна, так как кайма замещения у таких зерен имеет такую же ширину, как и у зерен с меньшим размером.

Таким образом, благоприятным для обнаружения значительных концентраций полностью сохраненных высококачественных хромитовых руд всех структурных типов является отсутствие или слабое проявление наложенных вторичных преобразований – диопсидизации, фельдшпатизации,

Таблица. Химический состав рудных и аксессуарных хромшпинелидов из реститовых ультрамафитов, мас. %

Table. Chemical composition of ore and accessory chromspinelides from restite ultramafites, wt. %

Массив Massif	Тип минерализации Type of mineralization	Степень изменения породы Degree of change in rock	Содержание элемента, мас. %/Content of element, wt. %									
			MgO	Al ₂ O ₃	TiO ₂	V ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	MnO	FeO*	ZnO	NiO	
Харчерузский (Полярный Урал) Kharcheruzsky (Polar Urals)	Рудная (густовкрапленные и сливные руды) Ore (densely disseminated and massive ores)	«Свежая» Unchanged	8,31	5,08	0,19	0,22	62,27	0,49	23,18	0,18	0,07	
			8,05	4,41	0,19	0,15	63,38	0,62	23,12	0,03	0,06	
			9,38	6,93	0,05	0,03	60,89	0,33	22,21	–	0,17	
			9,64	7,00	0,10	0,08	60,99	0,50	21,40	0,08	0,21	
			7,93	6,19	0,06	0,16	62,60	0,80	22,11	0,06	0,08	
		7,35	5,84	–	0,08	62,42	0,60	23,60	0,03	0,08		
		8,00	6,20	0,03	0,07	61,21	0,48	23,86	0,06	0,08		
		6,19	5,16	0,04	0,20	62,67	0,59	24,82	0,14	0,18		
		6,43	5,50	0,02	0,09	63,45	0,51	23,79	0,15	0,07		
		6,98	11,93	–	–	53,79	–	26,81	0,52	–		
	3,54	1,58	0,36	0,48	61,89	–	31,63	0,45	–			
	3,77	2,05	0,54	0,62	55,81	–	36,98	0,47	–			
	5,21	3,21	0,43	0,65	54,89	–	35,36	0,47	–			
	2,43	0,45	1,12	0,48	19,08	0,67	75,87	–	0,57			
	2,71	0,93	1,71	–	9,24	1,11	84,10	–	0,51			
	0,81	0,91	2,00	0,65	10,02	–	86,29	–	–			
	3,80	1,45	1,00	0,41	25,41	–	67,37	–	0,67			
	–	–	–	0,94	7,40	0,48	91,42	–	–			
	Сыум-Кеу (Полярный Урал) Syum-Keu (Polar Urals)	Рудная (густовкрапленные и сливные руды) Ore (densely disseminated and massive ores)	«Свежая» Unchanged	12,43	7,02	0,17	–	59,81	–	19,92	–	–
				12,1	8,61	0,33	–	55,17	–	22,91	–	–
12,08				6,37	0,1	–	60,6	–	20,22	–	–	
12,85				6,41	0,13	–	61,13	–	18,87	–	–	
12,55				7,29	0,15	–	59,28	–	20,04	–	–	
Центр зерна / Center of grain												
11,26			8,1	0,17	–	56,09	–	23,56	–	–		
10,28			9,02	0,15	–	55,07	–	24,71	–	–		
10,21			9,99	0,2	0,17	59,17	0,08	19,79	0,1	0,06		
11,98			6,77	0,14	–	59,81	–	20,66	–	–		
Кайма замещения / Border of substitution												
9,84		2,77	0,21	–	28,02	–	54,92	–	–			
11,52		4,77	0,95	–	40,51	–	39,53	–	–			
8,73		11,44	0,44	–	46,72	–	31,46	–	–			
8,1		15,72	0,33	–	40,26	–	34,23	–	–			
7,28		11,08	0,41	–	47,6	–	32,53	–	–			
11,25		15,07	0,10	0,30	50,62	0,27	22,13	0,14	0,12			
10,28		19,46	0,25	–	49,14	–	20,60	0,19	0,07			
4,76		10,96	0,58	–	56,98	0,70	25,85	–	0,17			
10,96		17,27	0,32	0,08	47,93	0,29	23,01	0,06	0,07			
11,62	18,48	0,36	0,10	47,43	0,16	21,66	0,08	0,11				
2,20	0,16	0,73	0,16	24,06	0,41	71,99	0,07	0,22				
2,78	0,41	0,58	0,20	29,43	0,46	65,69	0,19	0,26				
0,85	0,05	0,60	0,19	6,65	0,11	91,21	0,05	0,28				
1,11	0,08	0,73	0,25	12,60	0,25	84,52	0,08	0,36				
1,26	0,06	0,52	0,22	9,01	0,17	88,21	0,11	0,44				
Калнинский (Западный Саян) Kalminsky (Western Sayan)	Рудная (густовкрапленные руды) Ore (densely disseminated ores)	«Свежая» Unchanged	11,06	13,08	–	–	54,52	–	21,34	–	–	
			11,16	13,23	–	–	55,08	–	20,53	–	–	
			12,05	13,96	–	–	53,37	–	20,62	–	–	
			12,39	13,45	–	–	54,43	–	19,73	–	–	
			10,59	9,91	–	–	58,28	–	21,22	–	–	
	9,78	13,32	–	–	52,88	–	24,02	–	–			
	9,93	12,82	–	–	53,58	–	23,66	–	–			
	9,1	12,49	–	–	54,9	–	23,49	–	–			
	9,76	12,98	–	–	53,54	–	23,72	–	–			
	11,54	13,07	–	–	54,67	–	20,71	–	–			
Агардагский (Тыва) Agardagsky (Tuva)	Рудная (сливные руды) Ore (massive ores)	«Свежая» Unchanged	10,70	8,50	0,14	0,12	64,72	0,54	15,30	–	–	
			12,38	9,73	–	0,17	62,32	0,25	14,89	0,12	–	
			15,90	12,44	–	–	57,64	0,33	13,31	–	0,18	
			11,99	14,15	0,11	0,17	58,00	0,35	14,71	–	0,31	
	13,46	15,75	–	0,19	55,72	0,28	14,18	0,13	–			
	12,19	7,81	0,08	0,11	63,97	–	15,55	0,12	–			
	13,72	13,23	0,11	0,18	57,87	0,34	14,34	0,20	–			

Окончание таблицы

Table

Массив Massif	Тип минерализации Type of mineralization	Степень изменения породы De- gree of change in rock	Содержание элемента, мас. %/Content of element, wt. %									
			MgO	Al ₂ O ₃	TiO ₂	V ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	MnO	FeO*	ZnO	NiO	
Идарский (Восточный Саян) Idarsky (Eastern Sayan)	Акцессорная Accessory	«Свежая» Unchanged	6,97	19,72	–	0,42	42,04	0,58	29,23	0,99	0,05	
			7,47	20,47	–	0,35	42,88	0,43	27,56	0,75	0,10	
			6,21	17,19	–	0,17	44,96	0,68	29,81	0,94	0,03	
			5,43	14,93	0,04	0,39	46,31	0,83	30,91	1,15	–	
			6,92	21,25	–	0,55	40,99	0,73	28,52	1,00	0,04	
		Измененная Changed	0,76	0,42	1,52	0,52	25,18	0,87	69,89	0,25	0,59	
			0,54	2,10	–	0,16	13,47	0,32	82,98	–	0,43	
			1,08	0,25	1,41	0,30	17,25	0,37	79,23	–	0,11	
			0,95	0,49	1,51	0,41	15,79	0,44	79,83	–	0,58	
			0,81	–	0,10	0,11	2,79	0,26	95,93	–	–	

Примечание. Диагностика химического состава хромшпинелидов выполнена методом рентгеноспектрального микроанализа [17] на электронном сканирующем микроскопе «Tescan Vega II LMU», оборудованном энергодисперсионным спектрометром INCA Energy 350 и волнодисперсионным спектрометром INCA Wave 700 в ЦКП «Аналитический центр геохимии природных систем» ТГУ (г. Томск), аналитики А.С. Кульков, О.В. Бухарова.

Note. Diagnostics of chemical composition of chromospinelides was performed by X-ray spectral microanalysis [17] on electron scanning microscope «Tescan Vega II LMU» equipped with energy-dispersive spectrometer (with detector Si (Li) Standard) INCA Energy 350 and wave-dispersive spectrometer INCA Wave 700 at TPU «Analytic center of natural system geochemistry» (Tomsk), operators are A.S. Kulikov, O.V. Bukharova.

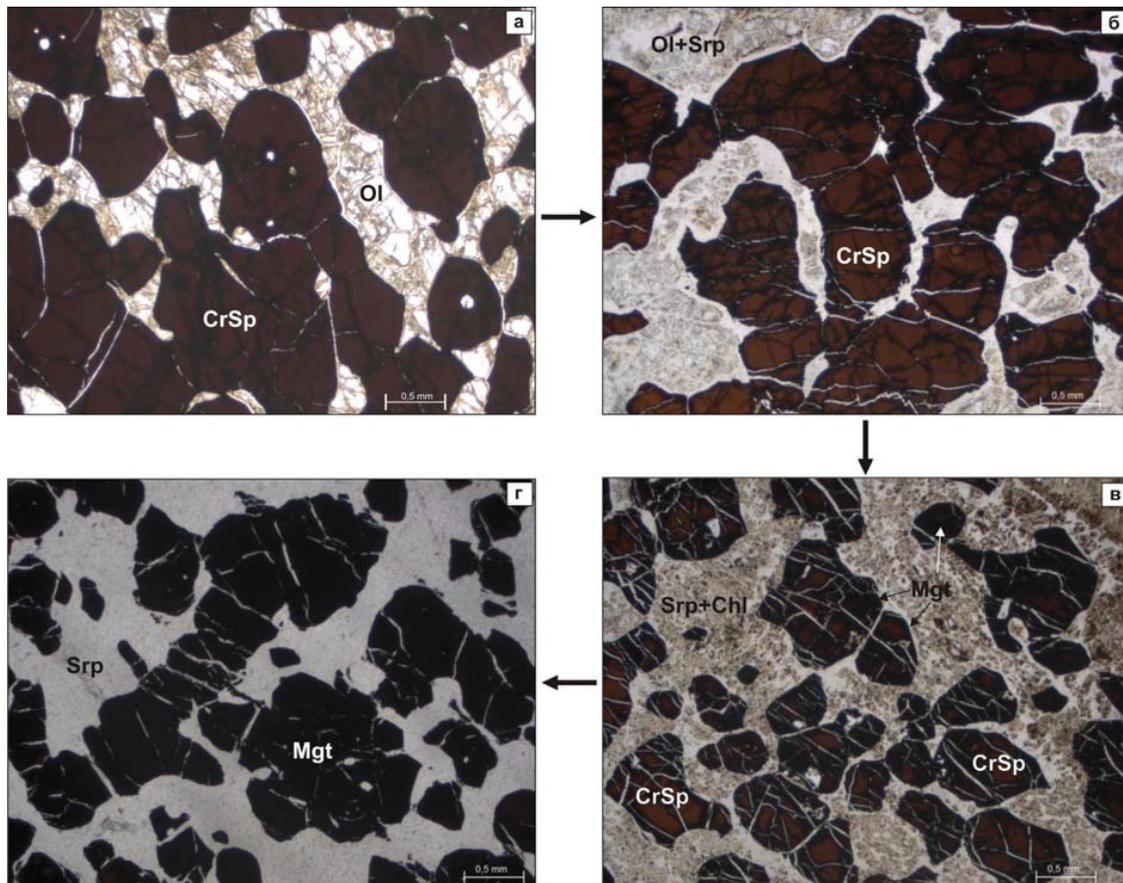


Рис. 1. Среднекрупные хромиты из Калнинского ультрамафитового массива (Западный Саян, Красноярский край). Показано изменение химического состава хромшпинели по мере возрастания интенсивности серпентинизации породы и степени ее тектонического дробления. Вишнево-красные, буро-коричневые хромиты замещаются железистыми разновидностями (феррохромит, хроммагнетит, магнетит) черного цвета. Ol – оливин; Srp – серпентин; Chl – хлорит; CrSp – хромшпинель; Mgt – магнетит (хроммагнетит)

Fig. 1. Medium-sized chromitites from Kalninsky ultramafic massif (Western Sayan, Krasnoyarsk Territory) with increase in degree of tectonic crushing (in transmitted light). The change in chemical composition of chromospinel with increasing intensity of serpentinization of rock and degree of its tectonic crushing is shown. Cherry-red and brown chromites are replaced by ferrous varieties (ferrochromite, chromium magnetite, magnetite) in black color. Ol – olivine; Srp – serpentine; Chl – chlorite; CrSp – chromospinel; Mgt – magnetite (chrommagnetite)

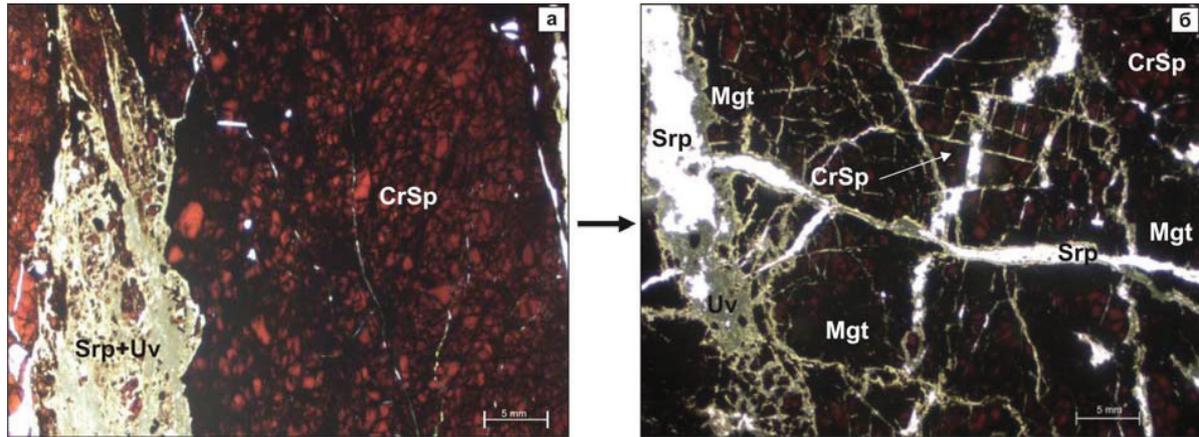


Рис. 2. Линзочки сливных хромшпинелидов, выявленные среди дунитов Агардагского ультрамафитового массива (республика Тыва): а) целостность рудного тела не нарушена тектоническим воздействием; б) рудное тело испытало тектоническое дробление и растаскивания на отдельные субблочки. CrSp – хромшпинель; Mgt – магнетит (хроммагнетит); Srp – серпентин; Uv – уваровитовый гранат

Fig. 2. Lenses of massive chromospinelides found among dunites of Agardagsky ultramafic massif (the Republic of Tyva): a) integrity of ore body is not disturbed by tectonic action; б) ore body was subjected to tectonic crushing and tearing to separate sub-blocks. CrSp – chromospinel; Mgt – magnetite (chrommagnetite); Srp – serpentine; Uv – uvarovite garnet

серпентинизации антигоритовой фации, хлоритизации. В ином случае интенсивное развитие данных процессов приводит к полному разубоживанию акцессорных и бедновкрапленных рудных хромшпинелидов и частичному (за счет кайм замещения) снижению качества средневкрапленных рудных хромшпинелидов. Преобразование химического состава густовкрапленных и сливных руд, целостность которых не нарушена тектоническим воздействием, выражается только в незначительном повышении магнетитового минала в краевых частях рудных тел. Они полностью сохраняют свой качественный состав и технологические (комплекс химических, структурно-текстурных, физически и физико-химических особенностей руды, определяющих эффективную технологию ее обогащения) свойства (рис. 2, а).

Тектоника. Отмечено, что степень метаморфогенного преобразования хромовых руд и, как следствие, их разубоживание резко возрастают при интенсивном тектоническом дроблении маломощных рудных тел, особенно сложенных бедно-средневкрапленными рудами (рис. 1, 2). Данный процесс сопровождается будинажем рудных тел и образованием мелких разрозненных линз.

При оценке потенциальной локализации хромитовых линз (жил) в исследуемом геологическом объекте, а также выяснения роли и интенсивности тектонического воздействия на рудное тело успешно показали себя методы микроструктурного анализа оливина и пироксенов [18–22]. Однако число работ, посвященных изучению собственно микроструктур хромшпинелидов, формирующихся под воздействием пластических деформаций и тектонического преобразования, невелико [15, 23–26]. Вместе с тем подобные исследования для ряда других рудных минералов оказались весьма информативными при расшифровке генезиса и метаморфизма

медноколчеданных руд [27]. Пример данных исследований наводит на мысли о необходимости детального изучения морфологических и микроструктурных особенностей рудных хромшпинелидов.

Предварительно проведенные исследования в полированных аншлифах показывают, что тектоническое воздействие проявляется не только в преобразовании морфологии массивных рудных тел (будинаж, образование мелких разрозненных линз), но и в изменении морфологии отдельных зерен хромшпинелидов. Наиболее хорошо данные преобразования наблюдаются от средневкрапленных руд и гуще. При этом контакты тектонически ненарушенных и субпараллельно растресканных зерен хромшпинелида детально прослеживаются (рис. 3). Это обстоятельство, при условии отбора ориентированных образцов, позволяет отследить направленность развития тектонических преобразований в исследуемом массиве на микроуровне.

Отдельные зерна хромшпинелидов в таких тектонических зонах частично раскалываются и дробятся вследствие взаимного соударения и проворота. Как следствие всего этого в последующем происходит «растаскивание» по трещинкам отдельных фрагментов зерен и увеличение интенсивности их метаморфогенного преобразования, сопровождаемого выносом Al, Mg и Cr при накоплении Mn и Fe³⁺.

Обсуждение результатов и выводы

Таким образом, критерии сохранности хромитового оруденения и его качественного состава определяются характером пострудных процессов, к главным из которых относятся пострудная тектоника и вторичные преобразования.

Автор работы, при погружении в проблематику поставленного вопроса и изучении геологической литературы, обратил внимание, что часто боль-

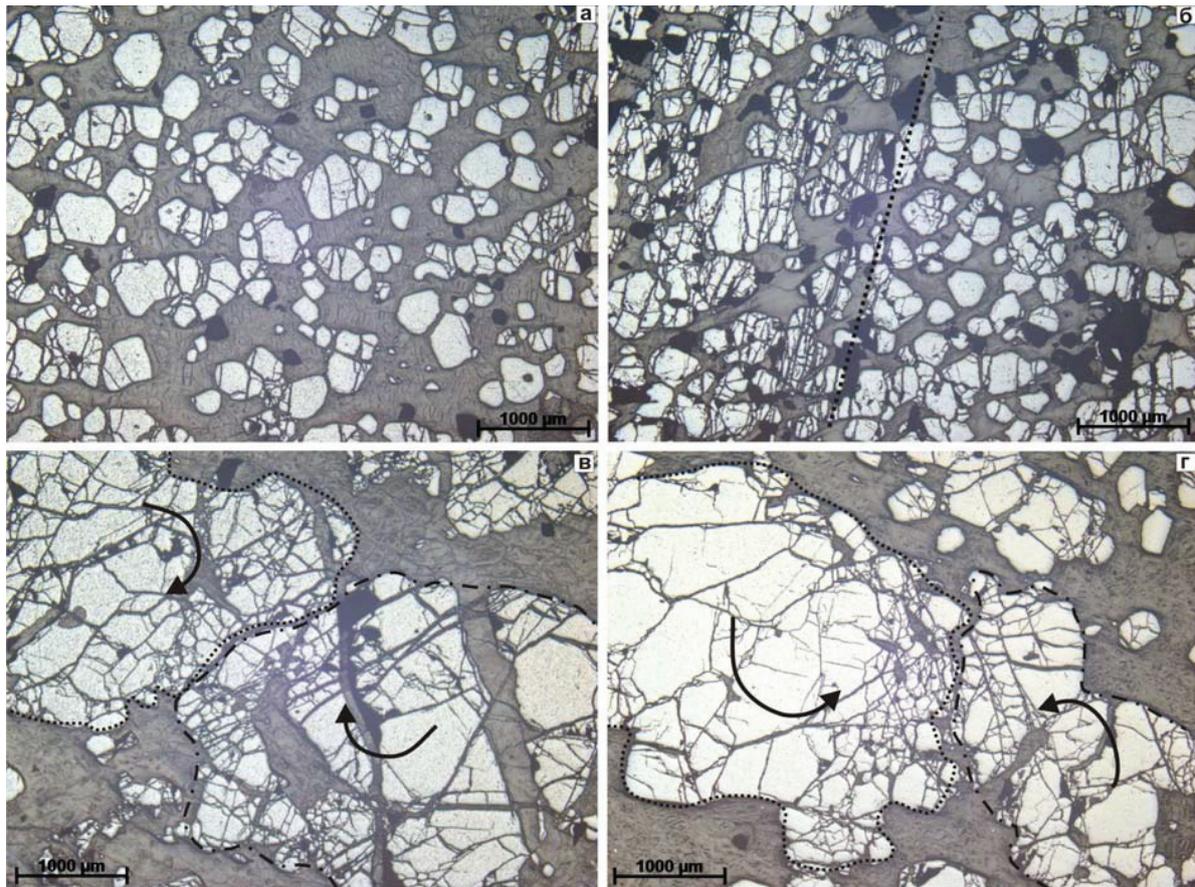


Рис. 3. Среднекрупные хромититы из Кемпирсайского массива (Южный Урал, Западный Казахстан) (аншлифы): а) целостность зерен тектонически не нарушена; б) контакт тектонически ненарушенных и субпараллельно растресканных зерен хромшпинелида; в–г) взаимное дробление зерен хромшпинелидов в результате соударения друг с другом

Fig. 3. Medium-sized chromitites from Kempirsaysky massif (Southern Urals, Western Kazakhstan) (polished sections): а) integrity of grains is not tectonically broken; б) contact of tectonically undisturbed and subparallel cracked grains of chromospinelide; в–г) mutual crushing of grains of chromospinelide as result of collision with each other

шинство исследователей относит вторичные процессы преобразования хромшпинелидов и вмещающих их ультрамафитов к числу метаморфических. Однако в данном случае здесь необходимо говорить о неизохимическом метаморфизме, а именно – о метасоматозе, так как во всех рассмотренных случаях имеет место замещение одних минералов другими с изменением валового химического состава.

При этом автору близка концепция И.С. Чащухина [15] и он считает, что в процессе своего исторического развития ультрамафитовые массивы испытывают как раннюю регрессивную (метасоматическую) стадию, так и более поздние наложенные прогрессивно-регрессивные (метаморфически-метасоматические) стадии преобразования в ходе проявления более позднего магматизма. Процессы метасоматизма респитовых ультрамафитов в основном приводят к серпентинизации силикатной матрицы и преобразованию химического состава хромшпинелидов (вынос из них Al, Mg и Cr при накоплении Mn и окислении закисного железа в окисное). Высвобождаемые подвижные Al и Mg

уходят в серпентин, а Cr, как известно, является слабо подвижным. Однако, как показывают наблюдения, он может входить в кристаллическую решетку силикатов, при этом наиболее благоприятными условиями для этого являются наложенные метасоматические процессы. Под воздействием постмагматических пневматолитового-гидротермальных растворов происходит вынос элемента из хромшпинели и его локальная миграция с образованием хромсодержащих силикатов – преимущественно уваровитовых гранатов и хромовых хлоритов (кочубейта и кеммерерита) (рис. 2, б; рис. 4).

В силу своих физико-химических особенностей хром в гидротермальном процессе имеет повышенную инертность, что обуславливает отсутствие его выноса за пределы хромитовых линз и локальное перераспределение [28]. Данное обстоятельство объясняет тяготение показанных хромсодержащих силикатов к хромититам и их отсутствие в породах с маломощной вкрапленной хромитовой минерализацией, где гидротермы обогащены компонентами серпентинитов.

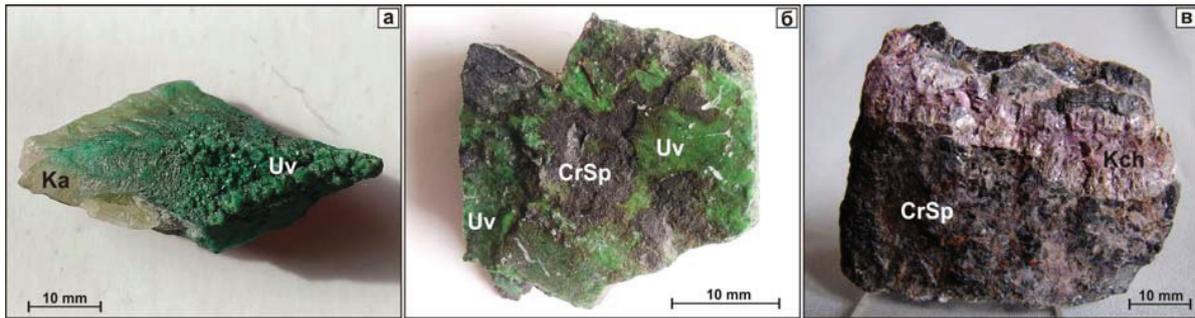


Рис. 4. Хромсодержащие силикаты из хромититов Агардагского ультрамафитового массива (республика Тыва): а) кристаллические выделения уваровита по кальцитовой жиле; б) агрегативные (пудра) выделения уваровитового граната в интерстициях между зернами хромшпинелида; в) жилка кочубейта (клинохлора розовато-сиреневого цвета) в густовкрапленном хромитите. Uv – уваровит; Kch – кочубейт; Ka – кальцит; CrSp – хромшпинель

Fig. 4. Chromium-containing silicates from chromitites of Agardagsky ultramafic massif (Republic of Tyva): a) crystalline secretions of uvarovite over calcite vein; б) aggregative (powder) secretions of uvarovite garnet in interstices between chromspinelides; в) vein of kochubeite (clinoclora of pinkish-lilac color) in densely disseminated chromitite. Uv – uvarovite; Kch – kochubeite; Ka – calcite; CrSp – chromspinel

Также автор не может однозначно согласиться с наблюдениями С.В. Москалевой [1], что при активном проявлении хотя бы одного из двух факторов (пострудной тектоники или метасоматических преобразований) хромовые руды разубоживаются и уничтожаются. Так, проявление интенсивного метасоматизма при отсутствии тектонического воздействия практически не оказывает никакого существенного воздействия на качественный состав и технологические свойства густовкрапленных и сливных рудных тел.

При существенном нарушении целостности рудного тела (растрескивание, растаскивание, будинаж) даже незначительные метасоматические преобразования могут привести к значимым ухудшениям его промышленного потенциала.

Такие наблюдения показывают, что прогнозирование качества ожидаемого хромитового оруденения возможно только при одновременной оценке

двух этих преобразующих агентов. Автор считает, что только синхронное интенсивное проявление как пострудной тектоники, так и метаморфогенных преобразований может привести к полному разубоживанию хромитового оруденения и выводит тектонический фактор в число наиболее значимых.

Исследование микроструктур хромшпинелидов позволяет оценить морфологическую сохранность рудного тела и его предварительный качественный состав. При этом хромитовые тела будут сохранять первоначальную форму в участках исследуемого объекта, не подвергшихся тектонической переработке, дроблению. В противном случае происходит будинаж рудных тел, образование мелких разрозненных линз, раскалывание и дробление отдельных зерен и, как следствие всего этого, увеличение интенсивности их метасоматического преобразования, вплоть до полной потери их промышленной ценности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Москалева С.В. Гипербазиты и их хромитоносность. – Л.: Недра, 1974. – 279 с.
2. Перевозчиков Б.В., Набиуллин В.И. Методические основы оценки ресурсного потенциала хромовых руд офиолитовых ультрабазитов // Вестник Пермского университета. Геология. – 2007. – № 4. – С. 91–105.
3. Юричев А.Н. Акцессорные шпинелиды из ультрамафитов: индикаторы условий формирования // Руды и металлы. – 2013. – № 6. – С. 30–34.
4. Макеев А.В., Брянчанинова Н.И. Топоминералогия ультрабазитов Полярного Урала. – СПб.: Наука, 1999. – 252 с.
5. Юричев А.Н. Калнинский ультрамафитовый массив Западного Саяна: рудная минерализация и ее генетическая природа // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326. – № 2. – С. 61–69.
6. Юричев А.Н. Критерии регионального и локального прогнозирования потенциальной хромитоносности подформных ультрамафитовых массивов складчатых областей // Руды и металлы. – 2016. – № 3. – С. 5–14.
7. 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.
8. 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.
9. Aswad K.J.A., Aziz N.R.H., Koyi H.A. Cr-spinel compositions in serpentinites and their implications for the petrotectonik history of the Zagros Suture Zone, Kurdistan Region, Iraq // Geological magazine. – 2011. – V. 148. – P. 802–818.
10. О явлениях метаморфизма хромшпинелида хромовых руд на примере Урала. Верхне-Уфалейская группа месторождений и Качкинское месторождение / О.А. Толканов, В.П. Чернобровин, В.Н. Ослоповских, А.В. Речкалова, И.Ю. Пашкеев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. – 2005. – № 3. – С. 3–12.
11. Turkin A.I., Sobolev N.V. Pyrope-knorringite garnets: overview of experimental data and natural paragenesis // Russian Geology and Geophysics. – 2009. – V. 50. – № 12. – P. 1169–1182.

12. Garnet-spinel-olivine-orthopyroxene equilibria in the FeO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-Cr₂O₃ system: I. Composition and molar volumes of minerals / G.P. Brey, A.M. Doroshev, A.V. Gurnis, A.I. Turkin // Eur. J. Mineral. – 1999. – V. 11. – № 4. – P. 599–617.
13. Сустанов С.Г., Вахрушева Н.В. Хромовый рутил в хромититах Енгайской площади массива Рай-Из // Вестник Уральского отделения Российского минералогического общества. – 2010. – № 7. – С. 159–162.
14. Discovery of diamond and an unusual mineral group from the podiform chromite ore Polar Ural / J. Yang, W. Bai, Q. Fang, F. Meng, S. Chen, Zh. Zhang, H. Rong // Geology in China. – 2007. – V. 34. – P. 950–953.
15. Строение, эволюция и минерагения гипербазитового массива Рай-Из / под ред. В.Н. Пучкова, Д.С. Штейнберга. – Свердловск: УрО АН СССР, 1990. – 227 с.
16. Вахрушева Н.В. Метаморфизм хромитоносных гипербазитов Полярного Урала: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Екатеринбург, 1996. – 204 с.
17. Reed S.J.B. Electron microprobe analysis and scanning electron microscopy in geology. – N.Y.: Cambridge University Press, 2005. – 189 p.
18. Shmelev V.R. Mantle ultrabasites of ophiolite complexes in the Polar Urals: petrogenesis and geodynamic environments // Petrology. – 2011. – V. 19. – № 6. – P. 618–640.
19. Chernyshov A.I., Yurichev A.N. The Structural Evolution of Dunite and Chromite Ore from the Kharcheruz Massif, the Polar Urals // Geotectonics. – 2016. – V. 50. – № 2. – P. 196–208.
20. Savelyeva G.N., Suslov P.V. Structure and composition of mantle peridotites at the boundary with crustal complexes of ophiolites in the Syumkeu massif, Polar Urals // Geotectonics. – 2014. – Т. 48. – № 5. – С. 347–358.
21. Karato S-I. The Dynamic structure of the deep Earth. – Princeton: Princeton University Press, 2003. – 256 p.
22. Karato Sh.-I. Deformation of Earth Materials: an Introduction to the Rheology of Solid Earth. – Cambridge: Cambridge University Press, 2008. – 463 p.
23. Christiansen F.G. Deformation of chromite: S.E.M. Investigations // Tectonophysics. – 1986. – V. 121. – № 2–4. – P. 175–196.
24. Christiansen F.G. Deformation fabric and microstructures in ophiolitic chromitites and host ultramafics, Sultanate of Oman // Geol. Rundsch. – 1985. – V. 74. – № 1. – P. 61–76.
25. Biswajit G., Jyotisankar R., Tomoaki M. Grain-scale plastic deformation of chromite from podiform chromitite of the Naga-Manipur ophiolite belt, India: Implication to mantle dynamics // Ore Geology Reviews. – 2014. – V. 56. – P. 199–208.
26. Ghosh, B., Konar, R. Textural developments in chromite deforming under eclogite-facies conditions from the Neoproterozoic Sittampundi anorthosite complex, Southern India // Geological Journal. – 2012. – V. 47. – P. 253–262.
27. Ярош П.Я., Буслаев Ф.П. Структуры руд и история формирования рудных агрегатов Узельгинского месторождения. – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1985. – 99 с.
28. Тюлюпо Б.М. Рудные месторождения. Черные металлы. – Томск: Изд-во Томского университета, 1976. – 176 с.

Поступила 08.06.2017 г.

Информация об авторах

Юричев А.Н., кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры петрографии геолого-географического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета.

UDC 553.461:553.08

METAMORPHISM AND TECTONICS: THE ROLE IN STRUCTURALLY-COMPOSITIONAL TRANSFORMATION OF CHROMSPHINELIDES FROM ULTRAMAFITES

Alexey N. Yurichev,

juratur@sibmail.com

National Research Tomsk State University,
36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the work is caused by the need to identify new local evaluation criteria of potential chromite mineralization, being currently scarce raw material for Russia, in ultramafic massifs of ophiolite complexes.

The main aim of the paper is to assess the nature of the effect of regressive metamorphism and post-ore tectonics on morphological safety of chromite ore body and its material composition for further predicting the quality of expected mineralization.

The methods used in the work: study of silicate and ore minerals in transparent sections and polished sections on the polarizing microscope AxioScope Carl Zeiss; evaluation of chemical composition of chromosphenelides on scanning electron microscope Tescan Vega II LMU, equipped with energy-dispersive spectrometer (detector Si (Li) Standard) INCA Energy 350 and wave-dispersive spectrometer INCA Wave 700.

The results. Criteria of preservation of chromite mineralization and its qualitative composition are determined by the nature of post-ore processes of metasomatism and tectonics. Forecasting the quality of expected chromite mineralization is possible only at simultaneous evaluation of these two converting agents. Metasomatism of ore chromosphenelides is caused by kinetic factor, which is manifested in decrease of intensity of metamorphogenic processes with increase in density of dissemination of chromite mineralization and in size of ore bodies. Densely embedded and massive ores, which integrity is not disturbed by tectonic action, almost completely retain their qualitative composition and industrial properties at any degree of metasomatic manifestation. Otherwise, the boudinage of ore bodies occurs, small scattered lenses are formed, individual grains are splitted and crushed and, as consequence, the intensity of their metamorphogenic transformation (removal of Al, Mg and Cr and accumulation of Mn and Fe²⁺) increases, up to the total loss of their industrial value.

Key words:

Ophiolites, ultramafites, chromosphenelides, metamorphism, tectonics, chemistry, structural features.

REFERENCES

1. Moskaleva S.V. *Giperbazity i ikh khromitonosnost* [Hyperbasites and their chromite-bearing properties]. Leningrad, Nedra Publ., 1974. 279 p.
2. Perevozchikov B.V., Nabiullin V.I. Methodical bases of estimation of resource potential of chrome ore from ophiolitic ultramafic rocks. *Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya*, 2007, no. 4, pp. 91–105. In Rus.
3. Yurichev A.N. Accessory spinels from ultramafites: indicators of formation conditions. *Rudy i metally*, 2013, no. 6, pp. 30–34. In Rus.
4. Makeev A.V., Bryanchaninova N.I. *Topomineralogiya ultrabazitov Polyarnogo Urala* [Topomineralogy of ultrabasites of the Polar Urals]. St. Petersburg, Nauka Publ., 1999. 252 p.
5. Yurichev A.N. Kalninsky ultramafic massif of Western Sayan: ore mineralization and its genetic nature. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 2, pp. 61–69. In Rus.
6. Yurichev A.N. Criteria of regional and local prediction of potential chromite-bearing of podiform ultramafic massifs of folded regions. *Rudy i metally*, 2016, no. 3, pp. 5–14. In Rus.
7. Perevozchikov B.V., Plotnikov A.V., Makiev T.T. Nature of variations in the composition of the ore and accessory chromespinels from Syum-Kaew ultrabasic massif (Polar Urals). *Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka*, 2007, no. 4, pp. 32–39. In Rus.
8. Yurichev A.N., Chernyshov A.I., Kulkov A.S. Ore mineralization of the Agardag ultramafic massif (Republic of Tyva). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 1, pp. 130–136. In Rus.
9. Aswad K.J.A., Aziz N.R.H., Koyi H.A. Cr-spinel compositions in serpentinites and their implications for the petrotectonic history of the Zagros Suture Zone, Kurdistan Region, Iraq. *Geological magazine*, 2011, vol. 148, pp. 802–818.
10. Tolkanov O.A., Chernobrovin V.P., Osloповskikh V.N., Rechkalova A.V., Pashkeev I.Yu. On phenomena of metamorphism of chromosphenelide of chromium ores on example of the Urals. Upper-Ufaleisky group of deposits and Kachkinsky deposit. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Metallurgiya*, 2005, no. 3, pp. 3–12. In Rus.
11. Turkin A.I., Sobolev N.V. Pyrope-knorringite garnets: overview of experimental data and natural paragenesis. *Russian Geology and Geophysics*, 2009, vol. 50, no. 12, pp. 1169–1182.
12. Brey G.P., Doroshev A.M., Giris A.V., Turkin A.I. Garnet-spinel-olivine-orthopyroxene equilibria in the FeO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-Cr₂O₃ system: I. Composition and molar volumes of minerals. *Eur. J. Mineral.*, 1999, vol. 11, no. 4, pp. 599–617.
13. Sustavov S.G., Vakhrusheva N.V. Chromite rutile in chromitites of Yengaysky area of Ray-Iz massif. *Vestnik Ural'skogo otdeleniya Rossiyskogo mineralogicheskogo obshchestva*, 2010, no. 7, pp. 159–162. In Rus.
14. Yang J., Bai W., Fang Q., Meng F., Chen S., Zhang Zh., Rong H. Discovery of diamond and an unusual mineral group from the podiform chromite ore Polar Ural. *Geology in China*, 2007, vol. 34, pp. 950–953.
15. *Stroenie, evolyutsiya i minerageniya giperbazitovogo massiva Ray-Iz* [Structure, evolution and mineralogy of Ray-Iz hyperbasite massif]. Eds. V.N. Puchkov, D.S. Shteynberg. Sverdlovsk, UrO AN SSSR Publ., 1990. 227 p.
16. Vakhrusheva N.V. *Metamorfizm khromitonosnykh giperbazitov Polyarnogo Urala*. Dis. Kand. nauk [Metamorphism of chromite-bearing hyperbasites of the Polar Urals. Cand. Diss.]. Ekaterinburg, 1996. 204 p.
17. Reed S.J.B. *Electron microprobe analysis and scanning electron microscopy in geology*. N.Y., Cambridge University Press, 2005. 189 p.

18. Shmelev V.R. Mantle ultrabasites of ophiolite complexes in the Polar Urals: petrogenesis and geodynamic environments. *Petrology*, 2011, vol. 19, no. 6, pp. 618–640.
19. Chernyshov A.I., Yurichev A.N. The Structural Evolution of Dunite and Chromite Ore from the Kharcheruz Massif, the Polar Urals. *Geotectonics*, 2016, vol. 50, no. 2, pp. 196–208.
20. Savelyeva G.N., Suslov P.V. Structure and composition of mantle peridotites at the boundary with crustal complexes of ophiolites in the Syumkeu massif, Polar Urals. *Geotectonics*, 2014, vol. 48, no. 5, pp. 347–358.
21. Karato S-I. *The Dynamic structure of the deep Earth*. Princeton, Princeton University Press, 2003. 256 p.
22. Karato Sh.-I. *Deformation of Earth Materials: an Introduction to the Rheology of Solid Earth*. Cambridge, Cambridge University Press, 2008. 463 p.
23. Christiansen F.G. Deformation of chromite: S.E.M. Investigations. *Tectonophysics*, 1986, vol. 121, no. 2–4, pp. 175–196.
24. Christiansen F.G. Deformation fabric and microstructures in ophiolitic chromitites and host ultramafics, Sultanate of Oman. *Geol. Rundsch.*, 1985, vol. 74, no. 1, pp. 61–76.
25. Biswajit G., Jyotiskanar R., Tomoaki M. Grain-scale plastic deformation of chromite from podiform chromitite of the Naga-Manipur ophiolite belt, India: Implication to mantle dynamics. *Ore Geology Reviews*, 2014, vol. 56, pp. 199–208.
26. Ghosh B., Konar R. Textural developments in chromite deforming under eclogite-facies conditions from the Neoproterozoic Sittampundi anorthosite complex, Southern India. *Geological Journal*, 2012, vol. 47, pp. 253–262.
27. Yarosh P.Ya., Buslaev F.P. *Struktury rud i istoriya formirovaniya rudnykh agregatov Uzelginskogo mestorozhdeniya* [Structure of ores and history of formation of ore aggregates of Uzelga deposit]. Sverdlovsk, UNTS AN SSSR Publ., 1985. 99 p.
28. Tyulyupo B.M. *Rudnye mestorozhdeniya. Chernye metally* [Ore deposits. Black metals]. Tomsk, Tomsk University Press, 1976. 176 p.

Received: 08 June 2017.

Information about the authors

Alexey N. Yurichev, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk State University.