

1. **Архангельская алмазоносная провинция** / Богатиков О.А., Гаранин В.К., Кононова В.А. и др. М.: Изд. МГУ, 1999. 524 с.
2. **Джейкс А., Луис Дж., Смит К.** Кимберлиты и лампроиты Западной Австралии. Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 430 с.
3. **Казаков И.И., Макушин А.А.** Перспективы коренной алмазоносности Башкирского мегантиклинория и сопредельных структур: Мат-лы Всерос. сов. Сыктывкар: Геопринт, 2001. С. 97-100.
4. **Макушин А.А.** Перспективы коренной алмазоносности Республики Башкортостан // Отечественная геология. 1997. № 7. С. 33-36.
5. **Малахов И.А.** Генетическая природа и алмазоносность туффзитов Красновишерского района на Северном Урале на основе изучения их состава и типохимизма минералов // Геология и металлогения Урала: Сб. науч. тр. Екатеринбург: ОАО "УГСЭ", 2000. С. 183-216.
6. **Малахов И.А.** Особенности высокотемпературного метаморфизма хромитовых руд в альпинотипных массивах Урала, сопровождающегося повышением их качества // Петрология магматических и метаморфических комплексов. Вып. 2: Мат-лы науч. конф. Томск: ЦНТИ, 2001. С. 306-311.
7. **Павлов Н.В., Кравченко Г.Г., Чурынина И.И.** Хромиты Кемпирсайского плутона. М.: Наука, 1968.- 168 с.
8. **Соболев Н.В.** Глубинные включения в кимберлитах и проблема состава верхней мантии. Труды ИГиГ СО АН СССР. Вып. 183. Новосибирск: Наука, 1974. 264 с.

УДК 551.461+553.491: 321.6 (470.5)

И.А. Малахов

ГЕНЕТИЧЕСКАЯ ПРИРОДА АНОМАЛЬНО ВЫСОКОХРОМИСТЫХ ШПИНЕЛЕЙ В ХРОМИТАХ УРАЛА И УСЛОВИЯ ИХ ОБРАЗОВАНИЯ

Аномально высокохромистым составом, как уже давно известно [1, 8], обладают шпинели во включениях в алмазах, в сростках с алмазами, а также в глубинных включениях гранатовых перидотитов, содержащихся в кимберлитах. Содержание хрома в них обычно колеблется от 62 до 67 % Cr_2O_3 , и такие хромшпинелиды обычно относят к алмазной субфации кимберлитов. Вместе с тем в основной массе кимберлитов всех регионов, включая Восточную Сибирь и Архангельскую область, широко распространены хромшпинелиды, характеризующиеся более умеренной хромистостью, содержащие 40-55 % оксида хрома. В этом отношении представляют определенный интерес данные по среднему их составу, приведенные в табл. 1.

Еще шире распространены хромшпинелиды в ультраосновных породах и генетически и пространственно связанных с ними хромитовых рудах. При этом с дунитовыми фациями альпинотипных массивов ультрамафитов, очень широко распространенных на Урале, обычно связаны более высокохромистые руды, содержащие 45-55 % Cr_2O_3 , а с гарцбургитами – более глиноземистые и умеренно хромистые руды, содержащие 35-40 % хрома.

Аномально высокохромистые шпинели, содержащие более 60 % оксида хрома, встречаются в дунитах альпинотипных массивов Урала крайне редко и пока были зафиксированы лишь в Кемпирсайском массиве на Южном Урале, где располагается, пожалуй, самое крупное месторождение высококачественных хромитовых руд. Однако в хромитовых рудах такие хромшпинелиды встречаются гораздо чаще. Значительное их количество в рудах этого массива было проанализировано Н.В. Павловым с коллегами [6], а в полярноуральских альпинотипных массивах – Райзском, Войкаро-Сыньинском и Сыумкеуском – А.Б. Макеевым и Н.И. Брянчаниновой [2].

Значение детального изучения хромшпинелидов очень велико еще и потому, что они, обладая весьма сложным и переменным составом, могут выступать в качестве надежных индикаторов условий формирования вмещающих их пород [11]. В дальнейшем мы показали, что они обладают очень низкой термодинамической прочностью, вследствие чего их удобно использовать для оценки температуры, давления и величины парциального давления кислорода при их первоначальном образовании или последующем метаморфизме.

Средний состав высокохромистых шпинелей из включений мантийных перидотитов и в содержащихся в них алмазах в кимберлитах Якутии [9] и Архангельской области [1]

Компоненты	Якутия		Архангельская область (СВ Русской платформы)				
	среднее из 25 ан.	среднее из 31 ан.	среднее из 200 ан.	золотницкое поле		верхотинское поле, ср. из 15	трубка В. Гриба, ср. из 19
				ср. из 85	ср. из 22		
	1	2	3	4	5	6	7
TiO ₂	0,21	0,31	0,29	0,74	2,57	1,05	0,56
Al ₂ O ₃	5,49	4,85	5,44	6,13	5,38	5,30	6,22
Cr ₂ O ₃	64,50	64,50	63,69	62,25	61,38	61,92	62,40
Fe ₂ O ₃	3,37	2,60	3,65	3,50	0,51	4,48	3,91
FeO	12,85	14,70	13,73	15,01	18,47	14,28	14,61
MnO	0,23	0,26	0,27	0,39	0,52	0,53	0,32
MgO	13,00	11,70	12,40	12,01	10,57	12,48	12,18
Сумма	99,64	98,92	99,48	100,03	99,80	100,04	100,20
Пересчет на кристаллохимическую формулу							
Ti	0,042	0,063	0,058	0,148	0,520	0,211	0,111
Al	1,716	1,544	1,711	1,918	1,707	1,659	1,940
Cr	13,527	13,774	13,438	13,064	13,067	13,003	13,058
Fe ³⁺	0,673	0,556	0,735	0,723	0,184	0,918	0,779
Fe ²⁺	2,850	3,293	3,065	3,308	4,159	3,149	3,234
Mn	0,052	0,059	0,061	0,088	0,119	0,119	0,072
Mg	5,140	4,711	4,933	4,752	4,243	4,941	4,805
Главные минеральные составляющие, %							
Ульвошпинель	0,8	1,2	1,1	2,7	9,5	3,9	2,1
Шпинель	10,7	9,6	10,7	11,9	10,3	10,2	12,0
Магнохромит	53,4	49,0	50,8	47,0	41,0	50,7	47,6
Хромит	30,9	36,7	32,9	33,9	38,1	29,5	33,4
Магнетит	4,2	3,5	4,6	4,5	1,1	5,7	4,8
Основные расчетные параметры							
FeO _{сумм}	15,88	17,04	17,02	18,16	18,93	18,31	18,13
Железистость (с FeO _{сумм})	41,3	45,7	44,2	46,9	52,0	46,5	46,3
Железистость (с FeO)	35,7	41,1	38,3	41,0	49,5	38,9	40,2
Хромистость	88,7	89,9	88,7	87,2	88,4	88,7	87,1
Доля Fe ³⁺ в R ²⁺	4,2	3,5	4,6	4,6	1,2	5,9	4,9

Примечание. 1, 3, 4, - включения в алмазах; 2 – сростки с алмазами; 5 – высокотитанистая ассоциация; 6, 7 – алмазонасный парагенезис.

Многолетний опыт изучения состава аксессуарных и рудообразующих хромшпинелидов из кимберлитов Среднего Тимана, разнообразных ультрамафитов, слагающих альпинотипные массивы Урала и ассоциирующие с ними хромитовые руды, убедили нас в том, что самой важной их характеристикой является железистость, определяемая по отношению двухвалентного железа к сумме его с магнием. Поскольку при метаморфизме пород и руд может происходить окисление железа, т. е. частичный его переход из двухвалентной формы в трехвалентную, удобнее приводить также величину железистости, рассчитываемой по величине общего его содержания: $FeO' = FeO + 0,9Fe_2O_3$ (для расчета по мас.%) или $FeO' = FeO + 2Fe_2O_3$ (для расчета по их молекулярным количествам).

Однако для построения диаграмм по составу хромшпинелидов, содержащихся в породах и рудах, необходимо также рассчитывать их хромистость $Y = Cr_2O_3 / (Al_2O_3 + Cr_2O_3)$ по их молекулярному соотношению, а также оценивать долю Fe³⁺ среди всех трехвалентных оксидов.

Большое значение расчетной величины железистости при изучении состава хромшпинелидов важно прежде всего потому, что наиболее высокая ее величина характерна для первичных, наиболее высокотемпературных разновидностей. Как следует из данных многочисленных выполненных нами расчетов для оливин-хромитовых равновесий по термометру Е.Д. Джексона [4], наиболее высокой температурой образования характеризуются хромшпинелиды из нодулярных руд (1300-1450 °С), которые Н.В. Павлов рассматривал как бесспорно магматические. Слагающие их хромшпинелиды обладают, как и хромшпинелиды из массивных руд Кемпирсайского массива, относительно низкой стабильной железистостью, колеблющейся от 27 до 39 %.

Хромшпинелиды с железистостью 40 % и выше, как и хромитовые руды в целом, претерпели метаморфизм или высокотемпературный диафорез, предшествующий серпентинизации ультраосновных пород и происходивший главным образом в интервале температур от 700 до 1000 °С. Для шпинелей с аномально высоким содержанием хрома правомочен подобный же подход при оценке генетической их природы и условий формирования.

Рассмотрим с этих позиций соотношение хрома и железистости f , выраженной в процентах в хромшпинелидах из включений и сростках их с алмазами, а также в находящихся в кимберлитах включениях гранатовых перидотитов (табл. 2).

Таблица 2

Соотношение хрома (мас.%) и железистости в высокохромистых хромшпинелидах кимберлитовой ассоциации по данным работ [1, 4, 9]

Форма выдел.	Cr ₂ O ₃	f, %	Cr ₂ O ₃	f, %	Cr ₂ O ₃	f, %	Cr ₂ O ₃	f, %
Включения в алмазах	65,2	41,1	64,1	35,0	65,0	36,8	64,7	41,0
То же	67,2	31,4	63,3	30,1	64,0	32,3	65,3	19,9
- // -	Среднее из 8		64,9	33,5	Сред. из 25		64,5	35,1
Сростки с алмазами	64,4	36,1	65,3	44,1	65,8	54,9	67,0	53,1
То же	68,6	50,0	Среднее из 5			66,2	38,6	
	Среднее из 31 сростка [9]						64,5	40,8
Из глубинных перидотитовых включений в кимберлитах	60,3	47,0	61,2	44,0	64,1	42,0	60,5	46,1
	60,5	46,1	68,7	47,3	65,3	46,4	61,7	48,8
	Среднее из 8 определений						62,8	46,0

Судя по представленным в табл. 2 данным среди хромистых шпинелей - включений и сростков с алмазами - преобладают низкожелезистые их разновидности, отвечающие по составу первичной и явно магматической ассоциации, а в перидотитовых ксенолитах представлены исключительно вторичными и более низкотемпературными парагенезисами.

Рассмотрим состав подобных высокотемпературных хромшпинелидов, встречающихся в альпинотипных массивах Урала, установленных как непосредственно нами, так и заимствованных из различных литературных источников. Следует при этом отметить, что хромшпинелиды с аномально высоким содержанием хрома в дунитах практически не встречаются и лишь однажды такой состав у аксессуарного хромшпинелида был установлен Н.В. Павловым [6] в рудоносном комплексе Кемпирсайского массива. Что же касается подобных хромшпинелидов из сплошных руд, то они в том же Кемпирсайском массиве были им зафиксированы по крайней мере 50 раз. Иногда среди подобных шпинелей встречаются и более железистые, обладающие метаморфической природой.

Если определять температуру образования пород и руд по любым термометрам, а также по предложенной нами специальной палетке, то мы приходим к парадоксальному выводу о том, что температура становления дунитов будет существенно ниже, чем температура образования находящихся среди них хромитов. Однако следует иметь в виду, что аксессуарные хромшпинелиды дунитов несравненно в большей степени подвергались воздействию наложенных процессов метаморфизма (высокотемпературного диафореза), чем ассоциирующие с дунитами хромитовые руды, что и приводит к более низким значениям расчетных температур их образования.

Следует также иметь в виду, что, согласно недавно полученным нами данным [5], при высокотемпературном метаморфизме рудообразующих хромшпинелидов происходит существенное увеличение содержания в них хрома и улучшение качества хромитовых руд. Однако во всех подобных случаях происходит повышение их железистости, что дает возможность отличать первичную их парагенетическую ассоциацию от вторичной. Рассмотрим в свете приведенных данных состав таких аномально хромистых шпинелей из хромитовых руд ряда уральских массивов.

Детальные исследования ультрамафитов и хромитов Халиловского хромитоносного альпинотипного массива на Южном Урале позволили установить, что среди многочисленных хромитовых жильных тел пластовой и линзовидной форм, располагающихся среди субмеридионально вытянутых полос дунитов среди гарцбургитов, широко распространены аномально высокохромистые шпинели, содержащие 60-67 % Cr₂O₃, то есть столько же, сколько его содержится в хромшпинелидах - включениях и в сростках с алмазами [1, 8, 9]. Химический состав ряда таких зерен хромшпинелидов, проанализированных с помощью микрозонда, и результаты их пересчетов на кристаллохимическую формулу, их главные минеральные группировки и основные расчетные параметры представлены в табл. 3.

Химический состав высокохромистых шпинелей
из хромитовых руд среди дунитов Халиловского массива

Номера анализов	1	2	3	4	5	6
TiO ₂	0,18	0,17	0,12	0,17	0,18	0,12
Al ₂ O ₃	8,84	8,03	11,68	9,60	11,20	11,53
Cr ₂ O ₃	61,66	61,81	61,37	61,41	61,35	61,03
Fe ₂ O ₃	3,31	1,68	0,75	3,31	1,64	0,72
FeO	11,16	12,56	12,17	11,01	11,10	12,32
MnO	0,27	0,23	0,23	0,22	0,18	0,19
ZnO	0,10	0,17	0,02	0,09	0,07	0,07
MgO	14,41	12,90	14,23	14,74	14,91	14,01
Сумма	99,93	97,55	100,57	100,55	100,63	99,99
Пересчет на кристаллохимическую формулу						
Ti	0,035	0,034	0,023	0,032	0,034	0,023
Al	2,698	2,537	3,495	2,893	3,341	3,450
Cr	12,626	13,101	12,317	12,406	12,277	12,332
Fe ³⁺	0,646	0,338	0,142	0,636	0,314	0,143
Fe ²⁺	2,419	2,828	2,585	2,354	2,357	2,629
Mg	5,563	5,155	5,385	5,615	5,625	5,309
Главные минеральные группировки, %						
Ульвошпинель	0,7	0,6	0,4	0,6	0,6	0,4
Шпинель	16,8	15,8	21,8	18,0	20,8	21,8
Магнохромит	52,4	48,3	45,4	52,0	49,3	44,8
Хромит	26,1	33,1	31,5	25,4	27,2	32,1
Магнетит	4,0	2,1	0,9	4,0	2,1	0,9
Основные расчетные параметры, %						
FeO _{сумм}	14,14	14,07	12,85	13,99	12,58	12,97
Железистость (с FeO _{сумм})	36,2	38,6	34,2	35,3	33,9	34,7
Железистость (с FeO)	21,9	21,8	32,2	29,5	31,5	25,0
Хромистость	77,1	76,8	77,9	81,1	79,0	74,5
Доля Fe ³⁺ в R ²⁺	4,0	3,4	0,9	4,0	1,3	4,9
Cr ₂ O ₃ / FeO _{сумм}	4,36	4,39	4,77	4,39	4,88	4,70

Обращает на себя внимание аномально высокое соотношение хрома и железа в таких хромшпинелидах и в слагающих ими рудах, достигающее четырех и более, что определяет их идеальную пригодность для металлургической и химической промышленности.

Проведенная нами систематизация химико-аналитических данных по ряду хромитоносных массивов Урала свидетельствует о достаточно большом количестве подобных примеров. В частности, такие хромшпинелиды были обнаружены в жильных дунитах среди гарцбургитов Варшавского массива и в дунитах Первомайского массива. Значительное количество проанализированных хромшпинелидов, содержащих более 60 % Cr₂O₃ в своем составе, было описано в работе Н.В. Павлова и др. [6] и А.Б. Макеева и др. [2].

На основе выполненной систематизации составов таких высокохромистых шпинелей можно вполне уверенно среди них выделять два основных типа: относительно низко железистый (f - 26-39 %) и с повышенной железистостью (f - 40-88 %). Рассмотренные в сравнительном плане типично низко железистые составы таких первичных шпинелей из Кемпирсайского, Райизского и Халиловского массивов приводятся в табл. 4.

Они обладают большим сходством по содержанию всех слагающих их основных элементов – железа, магния, алюминия и хрома, характеризуются близкой кристаллохимической формулой и содержанием слагающих их минеральных составляющих.

Обращает на себя внимание, что подобные высокохромистые шпинели из слабо метаморфизованных руд Кемпирсайского, Халиловского и других массивов содержат обычно лишь 13-15 % FeO и обладают железистостью 30-35 %, в то время как в хромшпинелидах из более метаморфизованных руд Рай-Изского и Войкаро-Сыньинского массивов FeO чаще всего составляет 17-20 %, железистость колеблется в пределах от 40 до 65 % (табл. 5).

Сопоставление составов высокохромистых шпинелей из хромитов
Кемпирсайского, Райизского и Халиловского массивов

Массив	Кемпирсайский				Рай-Из	Халиловский		
	массивная		нодулярная	густо-вкрапл.		массивная	массивная	
TiO ₂	0,14	0,13	0,28	0,26	0,10	0,20	0,17	0,18
Al ₂ O ₃	8,66	7,67	9,27	8,93	7,72	8,37	10,90	8,73
Cr ₂ O ₃	64,00	64,59	62,28	62,67	62,46	62,04	61,16	61,95
Fe ₂ O ₃	0,87	2,08	2,22	2,27	4,20	3,90	1,11	2,00
FeO	13,21	11,15	11,99	11,91	10,91	10,86	11,76	12,33
MnO	0,17	0,13	0,17	0,18	0,00	0,18	0,21	0,19
MgO	13,25	14,49	14,20	14,20	14,61	14,71	14,28	13,50
Сумма	100,29	100,24	100,42	100,43	100,00	100,35	99,58	98,88
Пересчет на кристаллохимическую формулу								
Ti	0,027	0,025	0,054	0,050	0,040	0,039	0,033	0,035
Al	2,648	2,338	2,808	2,709	2,357	2,544	3,300	2,701
Cr	13,128	13,207	12,654	12,751	12,786	12,650	12,462	12,858
Fe ³⁺	0,169	0,405	0,430	0,440	0,818	0,756	0,212	0,397
Fe ²⁺	2,866	2,411	2,577	2,564	2,361	2,287	2,466	2,659
Mn	0,037	0,028	0,037	0,039	0,000	0,039	0,045	0,040
Mg	5,124	5,586	5,440	5,447	5,639	5,655	5,468	5,283
Главные минеральные группировки, %								
Ульвошпинель	0,5	0,5	1,0	0,9	0,4	0,7	0,6	0,7
Шпинель	16,5	14,6	17,5	16,9	14,7	15,8	26,0	16,8
Магнохромит	47,4	55,1	50,3	51,0	55,7	54,6	47,6	49,0
Хромит	34,5	27,3	28,5	28,4	24,1	24,2	29,8	31,1
Магнетит	1,1	2,3	2,7	2,7	5,0	4,7	1,3	2,5
Основные расчетные параметры, %								
FeO _{сумм}	13,99	13,02	13,99	13,95	14,69	14,37	12,76	14,13
Железистость (с FeO _{сумм})	37,7	33,9	36,0	36,0	36,1	35,9	33,9	35,9
Железистость (с FeO)	35,9	30,1	32,2	32,0	29,6	24,2	31,5	23,9
Хромистость	83,2	85,0	81,8	82,5	84,4	75,6	79,0	77,2
Доля Fe ³⁺ в R ³⁺	1,1	2,5	2,7	2,8	5,1	5,3	1,3	2,5
Cr ₂ O ₃ / FeO _{сумм}	4,57	4,96	4,45	4,49	4,25	4,32	4,79	4,38

Подобный же вывод можно сделать из сопоставления систематических данных по железистости таких хромшпинелидов из руд отмеченных массивов (табл. 6).

Преобладание метаморфизованных более железистых по составу высокохромистых шпинелей в полярноуральских хромитоносных массивах – Рай-Изском и Войкаро-Сыньинском – кажется вполне закономерным, учитывая, что они располагаются в зоне Главного уральского глубинного разлома и впоследствии претерпели интенсивные надвиговые дислокации и динамометаморфизм, которые привели к существенному преобразованию ультрамафитов и располагающихся среди них хромитов. При таких процессах высокотемпературного метаморфизма отношение хрома и суммарного железа может несколько снижаться, однако качество руд остается хорошим, и они вполне пригодны для использования. Мало того, в некоторых случаях в таких более железистых по составу высокохромистых шпинелях, судя по цифрам в таблице, содержание хрома может несколько возрастать.

Метаморфическая природа таких хромшпинелидов не вызывает сомнений. Как свидетельствуют данные микронзондового их изучения, для многих изученных индивидов периферическая их часть обладает более железистым составом, чем центральная (табл. 7).

Обращает на себя внимание более низкая температура формирования высокохромистых шпинелей, содержащихся в сплошных и густовкрапленных хромитовых рудах, которая на основе изучения оливин-хромитовых равновесий составляет 1000-1100 °С, по сравнению с более высокотемпературными и также низкожелезистыми хромшпинелидами в нодулярных рудах, образование которых происходило, как уже упоминалось, при температуре 1300-1450 °С.

Состав высокохромистых шпинелей из пород и руд в массивах альпинотипных ультрамафитов Урала, претерпевших высокотемпературный метаморфизм

Параметры	Кемпир-сайский	Рай-Изский	Войкаро-Сыньинский			Халиловский		
TiO ₂	0,13	0,10	0,00	0,00	0,00	0,13	0,07	0,07
Al ₂ O ₃	9,21	6,80	8,84	6,81	7,99	6,99	8,01	1,49
Cr ₂ O ₃	60,03	62,40	62,40	63,57	65,92	63,20	61,33	67,79
Fe ₂ O ₃	2,87	3,21	1,65	2,05	0,00	2,60	2,43	1,83
FeO	16,03	16,84	15,15	17,10	14,25	15,63	16,26	21,66
MnO	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,35	0,66	0,44
MgO	11,24	10,65	11,96	10,47	11,85	11,35	10,45	6,62
Сумма	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,25	99,52	99,90
Пересчет на кристаллохимическую формулу								
Ti	0,053	0,041	0,000	0,000	0,000	0,020	0,014	0,015
Al	2,857	2,141	2,733	2,146	2,448	2,184	2,529	0,494
Cr	12,494	13,173	12,941	13,441	13,552	13,244	12,987	15,089
Fe ³⁺	0,569	0,645	0,326	0,413	0,000	0,520	0,490	0,387
Fe ²⁺	3,530	3,761	3,324	3,825	3,224	3,463	3,642	5,101
Mn	0,047	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Mg	4,396	4,239	4,676	4,175	4,776	4,484	4,172	2,778
Главные минеральные группировки, %								
Ульвошпинель	0,5	0,4	0,0	0,0	0,0	0,5	0,4	0,3
Шпинель	17,9	13,4	17,1	13,4	13,7	13,6	23,2	3,1
Магнхромит	37,3	39,6	41,4	38,8	45,5	42,3	52,0	31,6
Хромит	40,9	42,7	39,5	45,3	41,7	40,3	19,4	62,6
Магнетит	3,5	4,0	2,0	2,6	0,0	3,3	5,0	2,4
Основные расчетные параметры, %								
FeO _{сумм}	18,62	19,73	16,64	18,95	14,25	17,97	18,45	23,31
Железистость (с FeO _{сумм})	48,7	50,9	43,8	50,4	40,3	48,0	51,6	67,7
Железистость (с FeO)	44,6	47,1	41,5	47,8	40,3	43,6	46,6	64,7
Хромистость	81,4	86,0	82,6	86,2	86,4	85,8	83,7	96,8
Доля Fe ³⁺ в R ³⁺	3,5	4,0	2,0	2,6	0,0	3,2	3,1	2,43
Cr ₂ O ₃ / FeO _{сумм}	3,22	3,16	3,75	3,36	4,64	3,52	3,32	2,91

Таблица 6

Соотношение хрома и железистости в высокохромистых шпинелях Кемпирсайского и группы полярноуральских массивов по данным [2, 6]

Массив, парагенезис	Cr ₂ O ₃	f, %	Cr ₂ O ₃	f, %	Cr ₂ O ₃	f, %	Cr ₂ O ₃	f, %
Кемпирсайский, первичный	62,72	32,6	61,68	39,7	62,28	31,4	64,03	38,4
	62,79	35,1	61,93	26,5	62,67	31,6	63,95	37,5
То же	62,90	33,4	63,66	28,1	62,68	29,1	62,99	32,0
- // -	61,75	36,1	64,02	33,2	62,90	34,6	62,91	28,4
- // -	62,87	39,7	63,71	29,5	62,41	30,0	63,07	34,0
- // -	61,52	34,6	63,96	30,3	62,42	33,0	60,09	33,5
- // -	64,00	35,4	61,69	33,9	63,91	30,0	62,29	30,1
- // -	62,32	33,9	62,22	32,3	63,57	33,1	62,53	32,4
- // -	61,76	36,2	62,14	35,6	63,11	35,9	62,69	30,0
- // -	62,10	30,2	63,25	38,6	63,98	27,1	62,46	32,1
- // -	64,59	29,6	62,44	33,6	63,34	29,6	61,29	34,6
- // -	Среднее для 44 анализов						62,76	32,9
Кемпирсайский, вторичный	60,21	42,0	62,90	41,2	62,48	48,5	61,12	41,1
	61,82	51,6	60,03	48,3	Среднее из 6		61,43	45,5
Рай-Изский, первичный	61,31	35,3	60,40	37,5	62,46	36,1	60,99	39,4
То же	Среднее из 4 анализов						61,29	37,1
Рай-Изский, вторичный	60,24	57,1	62,40	51,0	60,14	40,6	60,94	41,3
То же	60,29	40,1	Среднее из 5 анализов				60,80	46,0
Войкаро-Сыньинский и Сымкеуский, вторичный	61,36	55,0	60,19	42,1	65,92	40,3	60,03	82,3
	63,07	88,7	63,57	50,4	62,40	43,8		
То же	Среднее из 7 анализов						62,36	57,5

Измененные хромшпинелиды в хромитовых рудах альпинотипных ультрамафитов

Массив, тип руд	Халиловский, массивная		Варшавский, густовкрапленная		Первомайский, массивная		Шабровский, шпир в меланже	
	центр	кайма	центр	край	центр	край	центр	край
Точка зерна								
TiO ₂	0,07	0,07	0,43	0,15	0,12	0,12	0,00	0,05
Al ₂ O ₃	17,29	8,01	20,36	3,57	9,26	8,86	12,85	6,50
Cr ₂ O ₃	53,87	61,33	45,16	60,26	60,84	60,16	56,73	65,09
Fe ₂ O ₃	0,10	2,43	4,41	6,74	4,75	5,30	2,42	1,87
FeO	12,85	16,26	16,90	21,80	12,00	11,03	12,04	16,11
MnO	0,18	0,66	0,27	0,45	0,18	0,23	0,35	0,48
MgO	13,86	18,45	11,90	6,66	14,28	14,59	13,78	11,04
Сумма	98,31	99,53	99,48	99,82	101,43	100,29	98,17	101,14
Главные минеральные группировки, %								
Ульвошпинель	0,2	0,2	1,5	0,6	0,4	0,4	-	0,2
Шпинель	32,2	15,8	37,5	7,3	17,4	16,8	24,5	12,6
Магнохромит	33,2	36,3	17,9	27,3	50,3	53,1	42,0	41,6
Хромит	34,3	44,6	37,9	55,9	26,2	23,3	30,6	43,3
Магнетит	0,1	3,1	5,2	8,9	5,7	6,4	2,9	2,3
Основные расчетные параметры, %								
FeO _{сумм}	12,94	18,45	20,87	27,87	16,28	15,80	14,22	17,79
Железистость (с FeO _{сумм})	34,3	49,7	49,6	70,1	39,3	38,1	36,7	46,9
Железистость (с FeO)	34,2	46,6	44,3	64,7	32,1	29,8	32,9	45,0
Хромистость	67,6	83,7	59,8	91,9	81,5	82,0	74,8	87,0
Доля Fe ³⁺ в R ³⁺	0,1	3,1	5,3	8,9	5,7	6,4	2,9	2,3
Cr ₂ O ₃ / FeO _{сумм}	4,16	3,46	2,17	2,16	3,74	3,81	3,99	3,66

Следует учесть, что нодулярные текстурные типы руд обычно располагаются в периферических частях линзовидных хромитовых тел – в зонах разгрузки - и не претерпели сколь угодно существенного динамотермального метаморфизма при последующих субдукционных процессах в островодужную стадию, в отличие от центральных их частей, подвергшихся своеобразному фильтр-прессингу с образованием массивных типов руд на месте вкрапленных, включая нодулярные. Процессы перекристаллизации, сопровождающиеся частичным перераспределением магния и железа между оливином и хромшпинелидом вследствие этого и определяют более низкие расчетные температуры их равновесий.

Рассматривая влияние величины парциального давления кислорода при кристаллизации хромшпинелидов переменного состава, И.С. Чащухин [10] отмечал, что хромиты высокохромистого состава образовались при самых низких значениях летучести кислорода из известных – ниже буфера FMQ, при устойчивости графита и значительной мольной доле во флюиде метана и оксида углерода.

При анализе условий кристаллизации таких высокохромистых шпинелей нельзя игнорировать и мнение Г.П. Самсонова [7], на протяжении многих лет занимавшегося разведкой и изучением уникального по запасам Кемпирсайского месторождения хромитов и который пришел к выводу о гистеромагматическом и глубинном их происхождении.

Заключение

Из представленного обзора обширных данных по составу аномально высокохромистых шпинелей в кимберлитах и хромитовых рудах альпинотипных комплексов Урала можно сделать вывод о большом сходстве их химического состава. Судя по вариациям их железистости, можно сделать вывод о наличии как в кимберлитах и содержащихся в них глубинных перидотитовых включениях, так и в хромитовых рудах альпинотипных массивов Урала первичных парагенезисов хромшпинелидов, характеризующихся более магниезиальным составом, и вторичных, которым свойственна более высокая железистость.

Основной причиной присутствия алмазов в кимберлитах является присутствие в кимберлитовой магне летучих с высоким процентным содержанием оксида и диоксида углерода, а также метана, доля которых во флюиде, в основном состоящем из H₂O, тем больше, чем глубже образуется кимберлитовый расплав щелочно-ультраосновного состава. Сдвиг хорошо известных специалистам реакций $2CO = C + CO_2$ и $CO_2 + CH_4 = 2C + H_2O$ вправо означает появление свободной

углеродной фазы. В том случае, если эта реакция осуществляется в условиях повышенных глубин в мантии – ниже кривой перехода графит-алмаз – могут образовываться алмазные затравки, из которых в дальнейшем могут вырастать более крупные кристаллы.

Возникающие иногда ультраосновные расплавы, насыщенные летучими, представленными главным образом H_2O с небольшой примесью хлора, в зонах субдукции могут приводить к миграции хрома и железа и образованию высокотемпературного гидротермального вкрапленного хромитового оруденения – чаще всего среди дунитов нижней части ультраосновного разреза. Однако содержание оксида и диоксида углерода во флюиде оказывается ничтожно малым и соответственно не приводит к образованию алмазов.

Как следует из рассмотренных составов аномально высокохромистых шпинелей в рудах, располагающихся среди дунитов альпинотипных массивов, среди них выделяется два типа: первичный, более высокотемпературный, принадлежащие к которому хромшпинелиды обладают пониженной железистостью – от 27 до 40 %, и вторичные, обладающие более железистым составом, – от 40 до 88 %. К первому принадлежат многочисленные шпинели из хромитовых руд Кемпирсайского и частично Рай-Изского массивов, ко второму – шпинели из руд Войкаро-Сыньинского и частично Рай-Изского массива.

Таким образом, можно констатировать, что маложелезистые и высокохромистые хромшпинелиды Кемпирсайского и Рай-Изского массивов обладают несомненным сходством с высокохромистыми шпинелями алмазоносных парагенезисов в кимберлитах. Вместе с тем, более железистые также аномально высокохромистые шпинели могут обладать и метаморфическим происхождением. Они встречаются чаще всего в рудах полярноуральских массивов, подвергшихся интенсивным динамотермальным преобразованиям, но в ряде случаев отмечены среди измененных хромитов в других альпинотипных массивах Урала. Недавно состав и происхождение хромистых и глиноземистых хромшпинелидов метаморфической природы нами были специально рассмотрены [5]. Интересно отметить, что аналогом их по происхождению являются высокохромистые шпинели из глубинных включений гранатовых перидотитов в кимберлитах, судя по их составу, также обладающих метаморфическим происхождением. Во всяком случае наличие включений перидотитовых катаклазитов в трубке Удачная было установлено уже много лет назад [9].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Архангельская алмазоносная провинция** / Богатиков О.А., Гаранин В.К., Кононова В.А. и др. М.: Изд. МГУ, 1999. 524 с.
2. **Макеев А.Б., Брячанинова Н.И.** Топоминералогия ультрабазитов Полярного Урала. СПб: Наука, 1999. 253 с.
3. **Малахов И.А.** Глубина формирования ультрабазитов Урала и хромитового оруденения по термодинамическим данным // 1-й Междунар. геохим. Конгресс: Тезисы докл. М.: Изд. АН СССР, 1972. С. 151-162.
4. **Малахов И.А.** Петрохимия главных формационных типов ультрабазитов. М.: Наука, 1983. 223 с.
5. **Малахов И.А., Савохин И.В., Бурмако П.Л., Кузнецов В.И.** Влияние процессов метаморфизма и метасоматизма на состав хромшпинелидов в ультрамафитах и хромитах Урала // Изв. УГГА. Серия: Геология и геофизика. Вып. 13. 2001. С. 66-73.
6. **Павлов Н.В., Кравченко Г.Г., Чупрынина И.И.** Хромиты Кемпирсайского плутона. М.: Наука, 1968. 168 с.
7. **Самсонов Г.П.** О генезисе хромитов // Топорковские чтения: Международная научная горно-геологическая конференция. Вып. V. Рудный, 2001. С. 66-72.
8. **Соболев Н.В.** Глубинные включения в кимберлитах и проблема состава верхней мантии // Тр. ИГиГ СО АН СССР. Вып. 183. Новосибирск: Наука, 1974. 264 с.
9. **Соболев Н.В., Харьков А.Д.** Глубинные включения в кимберлитах // Глубинные ксенолиты и верхняя мантия. Новосибирск: Наука, 1975. С. 18-75.
10. **Чашухин И.С., Вотяков С.Л., Уймин С.Г. и др.** ЯГР-спектроскопия хромшпинелидов и проблемы окситермометрии хромитоносных ультрамафитов Урала. Екатеринбург: ИГиГ УрО РАН, 1996. 135 с.
11. **Irvine T.N.** Chromian spinel as a petrogenetic indicator. Pt. I. Theory. - *Canad. J. Earth Sci.*, 1965. Vol. 2. N 6. P. 648-672.