

- О низкотемпературной гексагональной модификации NaYF_4 со структурой гагаринита // Докл. АН СССР, 1963. Т. 150, № 4. С. 791–799.
16. *Соболев Б.П., Ипполитов Е.Г., Жигарновский Б.М., Гарашина Л.С.* О фазовом составе систем $\text{CaF}_2\text{—YF}_3$, $\text{SrF}_2\text{—YF}_3$ и $\text{BaF}_2\text{—YF}_3$ // Изв. АН СССР. Неорган. материалы, 1965. № 3. С. 362–368.
 17. *Феофилов П.П.* Поглощение и люминесценция двухвалентных ионов редких земель в кристаллах искусственного и природного флюора // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1956. № 26. С. 435.
 18. *Bergstl S., Jensen B.B., Neumann H.* Tveitite, a new Calcium yttrium fluoride // Lithos. 1977. Vol. 10. P. 81–87.
 19. *Bevan D.Y.M., Strähle Y., Greis O.* The crystal structure of tveitite, an Ordered yttriofluorite mineral // J. Solid State Chem. 1982. Vol. 44. P. 75–81.
 20. *Goldhmidt V.M.* Geochemische Verteilungsgesetze der Elemente // Skr. Norsk. Vid. Akad. Mat.-natur. Kl. 1926. Bd. 88, N 2. S. 501–503.
 21. *Uetani K., Ogimura Y., Kato A., Nagachima K.* Chemical studies of minerals containing rare elements from Far East district. L 1. Yttriofluorite from Shishogama, Kawamatamachi, Fukuchima Prefecture, Japan // Bull. Chem. Soc. Jap. 1968. Vol. 41, N 3. P. 603–605.

УДК 549.731.15,621.14,642.2:551.214 (574.2)

Э.М. СПИРИДОНОВ, Д.М. ДАШЕВСКАЯ

• ХРОМШПИНЕЛИДЫ И АССОЦИИРУЮЩИЕ С НИМИ МИНЕРАЛЫ РАННЕГЕОСИНКЛИНАЛЬНЫХ УЛЬТРАОСНОВНЫХ ВУЛКАНИТОВ СЕВЕРНОГО КАЗАХСТАНА

Хромшпинелиды являются чуткими индикаторами процессов петрогенеза и рудогенеза, это одна из существенных ликвидусных фаз магматических расплавов ультраосновного и основного состава. В зеленокаменно-измененных вулканитах хромшпинелиды — зачастую единственные реликтовые минералы, поскольку они достаточно устойчивы при низкоградном метаморфизме цеолитовой и пренит-пумпеллитовой фаций. Для подавляющего большинства хромшпинелидов характерна тонкая зональность, т.е. исследование их состава возможно только с помощью микрозонда. По этим причинам в настоящее время хромшпинелиды интенсивно исследуют [1–3, 7–11, 14, 15, 19–21, 23, 25, 26].

Особый интерес представляет хромшпинелиды и ассоциирующие с ними минералы вулканитов ультраосновного и близкого к нему состава. В Северном Казахстане такие вулканиты установлены Н.Я. Яценко [16]. Нами установлено относительно широкое их распространение в раннегеосинклинальных толщах этого района, изучены состав вулканитов и некоторые параметры их образования. Химический состав пород определен в лаборатории силикатного анализа Киевского университета (аналитик Л.Е. Бурксер), содержания микроэлементов — количественным спектральным анализом в ЦХЛ ПГО "ЦентрКазгеология". Большая часть анализов минералов выполнена с помощью микрозонда, эталонами при анализе служили синтетические хромит (Cr, Fe), магнетиоферрит (Mg), титаномагнетит (Ti, Fe), цинкит (Zn), химически анализированные шпинель (Al) и спессартин (Mn).

Хромшпинелиды с преобладанием FeCr_2O_4 отнесены к хромиту, MgCr_2O_4 — к магнетиохромиту, MgAl_2O_4 — к шпинели, FeAl_2O_4 — к герциниту, FeFe_2O_4 — к магнетиту, Fe_2TiO_4 — к ульвошпинели, $\text{Fe}_2\text{TiO}_4 + \text{FeFe}_2\text{O}_4$ — к титаномагнетиту [23].

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ПОЛОЖЕНИЕ И СОСТАВ УЛЬТРАОСНОВНЫХ ВУЛКАНИТОВ СЕВЕРНОГО КАЗАХСТАНА

В области каледонид на севере Центрального Казахстана (Ишкеольмесский антиклинорий и Степнякский синклиний) раннегеосинклинальные образования представлены карбонатно-черносланцево-терригенной формацией венда—раннего кембрия, офиолитовой группой формаций раннего—среднего кембрия, группой колчеданоносных субма-

Т а б л и ц а 1

Химический состав (в мас.%, микроэлементы – в г/т) раннегеосинклинальных вулканитов Северного Казахстана ультраосновного и близкого состава, с хромшпинелидами

Компоненты	1*	2	3	4	5	6	7	8	9
SiO ₂	–	37,92	36,67	42,52	41,02	42,46	43,31	51,45	57,92
TiO ₂	–	0,73	1,07	0,94	1,49	2,64	0,33	0,33	0,31
P ₂ O ₅	–	0,15	0,26	0,19	0,45	0,49	0,05	0,02	0,07
Al ₂ O ₃	–	4,08	5,90	10,97	13,83	14,73	7,22	9,82	11,40
Fe ₂ O ₃ + FeO	–	12,14	11,93	8,96	14,03	9,33	12,28	9,55	8,24
MnO	–	0,30	0,32	0,13	0,21	0,24	0,14	0,12	0,08
MgO	–	32,73	26,18	14,39	13,62	11,51	17,49	17,74	12,52
CaO	–	3,56	8,07	11,62	10,03	9,77	11,54	7,29	5,17
Na ₂ O	–	0,14	0,41	1,74	1,10	3,21	0,60	0,88	1,80
K ₂ O	–	0,30	0,26	0,54	0,32	1,92	0,10	0,30	0,38
H ₂ O*	–	7,66	8,47	7,69	4,03	3,70	6,62	2,13	1,90
Сумма	–	99,71	99,54	99,69	100,13	100,00	99,68	99,63	99,79
Cr	2600	2330	1780	1560	2800	620	4200	2400	1650
V	230	42	70	60	280	225	88	67	230
Ni	350	1400	1170	1650	840	580	1900	1100	930
Co	75	130	87	83	98	83	160	105	150
Cu	125	110	60	128	115	65	102	98	93
Zn	140	150	170	137	160	220	340	210	190
Pb	3,0	1,9	2,0	1,3	4,4	5,3	0,8	1,1	1,4
Sr	200	50	65	55	240	340	220	270	260
Ba	250	65	65	100	150	450	40	70	90
Zr	35	50	60	80	105	195	13	13	17

* Номер анализа.

П р и м е ч а н и е. Кварцитогорская свита ϵ_2 : 1 – туфы авгититов. Урумбайская свита ϵ_2 : 2 (Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана, № 85117) – щелочные пикриты, 3 (№ 85118) – туфы пикритов. Шункырацинская свита ϵ_3 – O_1t_1 : 4 (№ 85129) – пикрито-базальты. Аксуйская свита O_1t_2 : 5 (№ 85120) – пикритовые базальты, 6 (№ 85121) – щелочные оливиновые базальты, 7 (№ 85122) – базальтовые коматиты, 8 – марианиты, 9 – бониниты.

ринных дифференцированных формаций верхов среднего кембрия–раннего ордовика. Колчеданоносные вулканиты – среднеаксуйская серия (по Э.М. Спиридонову) представлена свитами: кварцитогорской ϵ_2 туфогенно (авгититы, базальты, дациты)–черносланцево-кремнистой; урумбайской ϵ_2 кремнисто-терригенно-вулканогенной (щелочные пикриты, базальты, дациты, трахилипаритодациты); шункырацинской ϵ_3 – O_1t_1 известняково-терригенно-вулканогенной (пикрито-базальты, трахибазальты, базальты, андезиты, трихиандезиты, дациты, трахидациты); аксуйской O_1t_2 вулканогенной (базальты, трахибазальты, шошониты, щелочные оливиновые базальты, спилитовые базальты, андезиты, дациты, базальтовые коматиты, марианиты, бониниты); ирадырской туфогенно (пикриты, трахибазальты)–терригенно-кремнистой O_1a_1 . Перечисленные вулканогенные толщи образуют практически непрерывный разрез и обладают многими сходными геолого-петрографическими и минералого-геохимическими особенностями вулканитов: резким преобладанием туфов над лавами, обилием туфотурбидитов, тефроидов и гиалокластитов; широким развитием туфокремнистых и кремнистых пород (фтаниты-спонголиты и др.); наличием пикритов, оливиновых базальтов, муджиеритов; сочетанием вкрапленников эндиопсида, авгита и гиперстена (нередко это инверсированный пижонит), хромшпинелидов [12].

В области неглубокого залегания докаледонского гнейсово-метаморфического

Т а б л и ц а 2

Химический состав (в мас.%) зональных и незональных выделений хромшпинелидов туфов авгититов кварцитогорской свиты Северного Казахстана

Компоненты	Незональные		Зональный		
	1/1	1/2	1/3я	1/3п	1/3к
Cr ₂ O ₃	62,25	56,14	55,78	56,40	57,15
Al ₂ O ₃	9,28	7,78	8,16	7,97	7,92
Fe ₂ O ₃	2,83	7,69	7,40	6,84	5,55
TiO ₂	0,08	0	0	0	0
MgO	11,91	9,06	8,68	8,37	7,31
FeO	14,98	19,32	19,98	20,43	22,06
MnO	0,23	0	0	0	0
Сумма	100,20*	100,00	100,00	100,00	100,00

Формульные единицы в расчете на три катиона

Mg	0,575**	0,455	0,436	0,422	0,371
Fe ²⁺	0,406	0,545	0,564	0,578	0,629
Mn	0,006	—	—	—	—
Ti	0,002	—	—	—	—
Cr	1,593	1,496	1,488	1,508	1,540
Al	0,354	0,309	0,324	0,317	0,318
Fe ³⁺	0,049	0,195	0,188	0,174	0,142

* Аналитик Э.М. Спиридонов, кроме того, ZnO — 0,5, CoO — 0,05, V₂O₃ — 0,09%; Ca, Si, Ni не обнаружены.

** Кроме того, Zr — 0,012, Co — 0,001, V — 0,002.

Примечание. Микронзонд "Camebax", аналитик Д.М. Дашевская. Точность определений при содержаниях более 10 мас. %: Cr₂O₃ — 0,39, Al₂O₃ — 0,21, MgO — 0,19, FeO — 0,27%; при содержаниях более 1–3 мас. %: TiO₂ — 0,09, MnO — 0,07, ZnO — 0,12%. В зональных выделениях хромшпинелидов: я — ядро, п — промежуточные зоны, к — внешняя зона, край.

фундамента (в ядерной части Ишкеольмесского антиклинория) раннегеосинклинальные образования слабо метаморфизованы — не выше цеолитовой фации, в пикритах сохраняется свежий оливин. В области глубокого погружения раздробленного гнейсово-метаморфического фундамента (на периклинали Ишкеольмеса и в Степнякском синклинии) раннегеосинклинальные образования интенсивно метаморфизованы в условиях пренил-пумпеллитовой фации [13], в вулканитах сохраняются только клинопироксен и хромшпинелиды.

В каждой из пяти свит колчеданосной среднеаксуйской серии нами изучены присущие только ей вулканиты ультраосновного и близкого состава (табл. 1).

Кварцитогорская свита. В низах свиты развиты туфы низкощелочных авгититов, относительно бедных Ni и Zr (см. табл. 1, ан. 1), клинопироксен в них — эндиопсид и авгит с 0,5–1,5% Cr₂O₃. В туфах и туфокремнистых микститах широко распространены мелкие (5–30, реже до 150 мк) кристаллы и осколки кристаллов хромшпинелидов. Это высокомагнийевый хромит, реже магнезиохромит (пикрохромит), относительно бедные Al, и Fe³⁺, с низкими и очень низкими содержаниями Ti, Mn, Zn (табл. 2). Выделения хромита микроскопически незональные. В некоторых зернах микронзондированием установлены слабый рост железистости и снижение глиноземистости от ядра к внешней зоне.

Урумбайская свита. В низах свиты относительно широко развиты щелочные пикриты (до меймечитов), слагающие покровы, обломки в туфах и гиалокластитах, субвулканические дайки и некки. Пикриты (см табл. 1, ан. 2) и туфы пикритов (ан: 3) района гор Ичкеульмес, где породы слабо метаморфизованы, отличаются низкими содержаниями Vb, Sr и Ba; содержания Cr достигают 0,6, Ni — 0,3%.

Таблица 3

Химический состав (в мас.%) зональных и незональных выделений хромшпинелидов щелочных пикритов урумбайской свиты Северного Казахстана, кристаллы-включения в оливине (2/1, 2/2, 2/3), в эндиопсиде (2/4), вкрапленники в цементирующей массе (2/5, 2/6)

Компоненты	Незональные		Зональный			Незональ- ные	Зональные
	2/1	2/2	2/3я	2/3п	2/3к	2/4	2/5я
Cr ₂ O ₃	44,94	43,13	45,01	44,78	44,89	39,56	40,17
Al ₂ O ₃	13,93	13,75	13,42	13,63	8,68	18,41	15,90
Fe ₂ O ₃	13,00	10,91	10,56	11,26	13,54	10,83	11,94
TiO ₂	0	2,34	1,46	1,54	4,65	1,69	1,79
MgO	11,21	11,91	9,59	10,55	15,13	10,43	8,83
FeO	16,93	17,93	20,68	19,48	14,40	20,59	22,57
MnO	0	0	0,37	0,32	0,39	0,39	0,42
Сумма	100,01	100,01	101,07	101,57	101,68	101,90	101,61

Формульные единицы в расчете на три катиона

Mg	0,541	0,572	0,464	0,505	0,717	0,489	0,424
Fe ²⁺	0,459	0,485	0,562	0,523	0,383	0,541	0,607
Mn	—	—	0,010	0,009	0,011	0,010	0,012
Ti	—	0,057	0,036	0,037	0,111	0,040	0,043
Cr	1,151	1,100	1,156	1,137	1,129	0,983	1,022
Al	0,532	0,522	0,514	0,516	0,325	0,682	0,603
Fe ³⁺	0,317	0,265	0,258	0,272	0,324	0,256	0,289

Примечание. Микронзонд "Camebax", аналитик Д.М. Дашевская; Ca, Si не обнаружены.

Субвулканические щелочные пикриты (обр. 2) — это массивные мелкозернистые породы, состоящие из существенно оливиновой массы и редких вкрапленников эндиопсида (до 1,5 см) и хромшпинелида (до 2,5 мм) (табл. 3). В интерстициях зерен оливина развиты небольшие количества девитрифицированного вулканического стекла и плагиоклаза Ca₇₅₋₇₇, ильменит, флогопит. Оливин примерно наполовину серпентинизирован. Наиболее ранние образования пикритов — вкрапленники эндиопсида — несколько зональны: центральные их зоны бледно-зеленого цвета, низкожелезистые (*f* 9–10), внешние зоны светло-зеленого цвета, более железистые (12–13) (табл. 4, ан. 2/8); в ядерной части одного из вкрапленников установлен эндиопсид предельного состава, крайне богатый Mg, без Fe и Al — Mg₅₉Ca₄₁ (ан. 2/7я), окруженный эндиопсидом состава Mg_{54,4}Ca_{40,0}Fe_{5,6} (ан. 2/7п). Эндиопсид беден марганцем, щелочными элементами, титаном, хром в нем не обнаружен (см. табл. 4), рентгенограмма у минерала авгитового типа. Оливин по составу отвечает хризолиту, довольно однороден (*f* 12–15), не содержит хром и кальций (ан. 2/9–2/12). Хромшпинелиды слагают мелкие включения в эндиопсиде и оливине и довольно крупные вкрапленники в цементирующей массе пикритов. Наиболее ранние из них — незональные кристаллы — в эндиопсиде и оливине

Зональные			Зональный				
2/5п ₁	2/5п ₂	2/5к	2/6я	2/6п ₁	2/6п ₂	2/6п ₃	2/6к
45,54	45,13	9,64	42,55	42,70	8,51	8,91	8,21
14,10	13,90	4,25	16,20	15,99	4,32	3,91	3,64
9,36	10,26	27,54	6,87	6,77	26,22	25,71	25,02
1,95	2,01	14,84	1,24	1,27	17,29	16,92	17,47
10,58	10,69	0,38	7,17	6,57	1,48	1,00	0,71
20,02	19,97	41,71	23,66	24,73	43,21	42,66	43,10
0,27	0,33	4,13	0,42	0,34	4,08	5,51	4,73
101,83	102,30	102,49	98,11	98,36	105,12	103,62	102,88

Формульные единицы в расчете на три катиона

0,504	0,507	0,021	0,357	0,328	0,077	0,053	0,037
0,535	0,532	1,254	0,662	0,694	1,255	1,263	1,290
0,008	0,009	0,126	0,012	0,010	0,120	0,135	0,143
0,047	0,048	0,401	0,031	0,032	0,452	0,451	0,470
1,150	1,136	0,274	1,126	1,133	0,234	0,250	0,233
0,531	0,522	0,180	0,639	0,632	0,177	0,163	0,153
0,225	0,246	0,745	0,173	0,171	0,685	0,685	0,674

сложены глиноземистым магнезиохромитом (см. табл. 3, ан. 2/1, 2/2) и высокомагнезиевым алюмохромитом (ан. 2/4), богатым Fe^{3+} , с содержанием титана до 2,3% TiO_2 . В зональных кристаллах хромшпинелида, заключенных в оливине, от центра к краю существенно снижаются содержания Al и Fe^{2+} , существенно возрастают — Mg, Fe^{3+} , Ti, содержания Cr и Mn не меняются (ан. 2/3я–2/3к). Ядра крупных зональных кристаллов хромшпинелидов в основной массе пикритов по составу и величине отражения отвечают ранним незональным хромшпинелидам — это темно-серые и серые в отраженном свете титанистые высокомагнезиевые хромиты и алюмохромиты. Они окружены светло-серой и серо-белой (в отраженном свете) каймой марганцовистого (около 4% MnO) хромтитаномагнетита с содержанием ульвошпинелевого компонента 40–47% (см. табл. 3, ан. 2/5к, 2/6п_{2,3}, 2/6к). Близко-одновременно с хромтитаномагнетитом внешних зон вкрапленников кристаллизовался ильменит в основной массе пикритов. Ильменит содержит заметное количество магнезия (до 2,5% MgO) и Fe^{3+} , слабо зонален по составу, внешняя зона железистая (см. табл. 4, ан. 2/13).

В туфах урумбайской свиты в обломках щелочных пикритов изучены хромшпинелиды зональных микровкрапленников (табл. 5). Эти хромшпинелиды марганцовистые

Т а б л и ц а 4

Химический состав (в мас.%) вкрапленников эндиопсида, оливина и ильменита цементующей массы щелочных пикритов урумбайской свиты Северного Казахстана

Компоненты	Эндиопсид				
	2/7я	2/7п	2/8я*	2/8п*	2/8к*
SiO ₂	54,96	50,52	50,12	48,82	49,79
TiO ₂	0	0	0,59	0,65	0,56
Al ₂ O ₃	0	3,35	4,36	4,27	4,32
Cr ₂ O ₃	0	0	0	0	0
Fe ₂ O ₃	0	1,21	1,45	1,69	2,49
FeO	0	3,70	3,84	4,71	4,83
MnO	0	0	0,12	0,12	0,14
MgO	23,11	20,20	18,75	19,85	18,13
CaO	22,33	20,66	20,25	18,51	18,51
Na ₂ O	0	0	0,26	0,25	0,14
K ₂ O	—	—	0,01	0,02	0,02
H ₂ O*	—	—	0,46	0,65	0,58
Сумма	100,40	99,64	100,01	99,54	99,51
Формульные единицы					
Si	1,940	1,825	1,818	1,782	1,836
Al	—	0,143	0,186	0,184	0,188
Fe ³⁺	—	0,032	0,040	0,046	0,069
Cr	—	—	—	—	—
Ti	—	—	0,016	0,018	0,016
Mg	1,216	1,088	1,014	1,080	0,996
Fe ²⁺	—	0,112	0,116	0,144	0,149
Mn	—	—	0,004	0,004	0,004
Ca	0,844	0,800	0,787	0,724	0,731
Na	—	—	0,018	0,017	0,010
K	—	—	0,001	0,001	0,001
Сумма			4		
f	0	9,3	10,6	12,1	13,3

* Химический анализ из навески 300 мг, аналитик Р.Л. Телешова.

Примечание. Микрозонд "Camebax", аналитик Д.М. Дашевская.

Оливин				Ильменит		
2/9	2/10	2/11	2/12	2/13я	2/13п	2/13к
40,06	39,92	39,79	40,04	0	0	0
0	0	0	0	47,23	47,00	46,78
0	0	0	0	0,18	0,27	0,30
0	0	0	0	0,04	0,08	0
0	0	0	0	14,02	13,70	14,00
11,93	14,01	13,70	12,95	37,61	38,93	38,87
Следы	Следы	Следы	Следы	0,59	0,46	0,47
47,60	46,06	46,44	47,15	2,40	1,59	1,53
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—
99,59	99,99	99,93	100,14	102,07	102,03	101,95
Формульные единицы						
0,994	0,996	0,991	0,992	—	—	—
—	—	—	—	0,005	0,008	0,009
—	—	—	—	0,259	0,253	0,259
—	—	—	—	0,001	0,001	—
—	—	—	—	0,868	0,869	0,866
1,759	1,712	1,724	1,740	0,087	0,058	0,056
0,247	0,292	0,285	0,268	0,769	0,801	0,800
—	—	—	—	0,012	0,010	0,010
—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—
3				2		
12,3	14,6	14,2	13,3	89,8	93,2	93,5

Т а б л и ц а 5

Химический состав (в мас.%) хромшпинелидов зональных вкрапленников в туфах щелочных пикритов урумбайской свиты Северного Казахстана

Компо- ненты	3/1я	3/1п ₁	3/1п ₂	3/1п ₃	3/1п ₄	3/1п ₅	3/1п ₆
Cr ₂ O ₃	40,82	41,78	41,24	41,36	40,04	39,91	37,48
Al ₂ O ₃	14,32	14,08	14,31	14,29	13,93	13,60	12,92
Fe ₂ O ₃	4,49	5,88	6,21	7,01	8,82	10,54	13,61
TiO ₂	3,22	2,14	2,38	1,90	1,98	2,27	2,38
MgO	0	0	0,97	0,92	1,27	1,35	1,79
FeO	34,78	33,62	32,77	31,97	30,94	26,76	25,90
MnO	2,38	2,50	2,12	2,55	3,02	2,57	3,31
ZnO	0	0	0	0	0	2,39	2,06
Сумма	100,01	100,01	100,01	100,01	100,01	99,39	99,45

Формульные единицы в расчете на три катиона

Mg	—	—	0,050	0,047	0,066	0,068	0,091
Fe ²⁺	1,014	0,982	0,950	0,927	0,897	0,759	0,738
Mn	0,070	0,074	0,062	0,075	0,089	0,074	0,096
Zn	—	—	—	—	—	0,157	0,136
Ti	0,084	0,056	0,062	0,050	0,052	0,058	0,061
Cr	1,126	1,154	1,130	1,134	1,098	1,071	1,010
Al	0,588	0,579	0,584	0,584	0,569	0,543	0,519
Fe ³⁺	0,118	0,155	0,162	0,183	0,230	0,269	0,349

Примечание. Здесь и в табл. 6,7: микронзонд "Сатебах", аналитик Д.М. Дашевская; Са, Si не обнаружены.

и титанистые, бедные магнием, как правило, обогащены цинком до 3,6% ZnO. С ними ассоциирует ильменит, слагающий многочисленные мелкие пластинчатые кристаллы. Ядерные части выделений хромшпинелидов сложены темно-серым или серым марганцовисто-титанистым глиноземистым хромитом без цинка (ан. 3/1я–3/1п₄), изредка марганцовистым феррихромитом без цинка (ан. 3/2я), промежуточные зоны – серыми марганцовисто-цинкистыми глиноземистым хромитом и феррихромитом, узкие внешние зоны светло-серого и белого цвета – марганцовисто-цинкистым хроммагнетитом (ан. 3/3пк). В ходе кристаллизации хромшпинелидов снижалось содержание Fe²⁺ и Ti, увеличивалось – Fe³⁺, концентрации Al снижались мало, лишь внешние каймы бедны Al. Интересной особенностью является наличие промежуточных зон с повышенными содержаниями алюминия и магния (ан. 3/1п_{2–7}, 3/3п_{5,6}).

Шункырацинская свита. Среди вулканитов свиты в незначительном количестве развиты пикрито-базальты, бедные V и Sr (см. табл. 1, ан. 4).

Изучены хромшпинелиды пикрито-базальтов, метаморфизованных в условиях пренит-пумпеллиитовой фации. Хромшпинелиды ассоциируют с эндиопсидом, маложелезистым авгитом и глиноземистым гиперстеном, ильменитом. Вкрапленники хромшпинелидов

Т а б л и ц а 5 (продолжение)

Компо- ненты	3/1п ₇	3/1п ₈	3/1к	3/2я	3/2к	3/3я	3/3п ₁
Cr ₂ O ₃	39,72	40,21	38,37	38,57	38,16	41,00	40,52
Al ₂ O ₃	13,88	13,95	11,96	8,65	6,58	13,95	14,11
Fe ₂ O ₃	20,88	22,58	17,94	19,54	23,93	7,08	9,71
TiO ₂	1,77	0	0	0	0	2,44	1,87
MgO	1,33	0	0	0	0	0	0
FeO	16,73	17,56	25,56	30,03	26,58	31,05	28,14
MnO	2,31	2,42	2,18	2,66	2,27	2,43	1,97
ZnO	3,39	3,27	3,00	0	1,96	1,59	2,92
Сумма	100,01	100,01	99,01	99,45	99,48	99,54	99,24

Формульные единицы в расчете на три катиона

Mg	0,067	—	—	—	—	—	—
Fe ²⁺	0,470	0,714	0,736	0,919	0,795	0,886	0,798
Mn	0,066	0,070	0,064	0,081	0,069	0,071	0,057
Zn	0,221	0,216	0,200	—	0,136	0,106	0,193
Ti	0,045	—	—	—	—	0,063	0,048
Cr	1,055	1,080	1,044	1,096	1,079	1,116	1,089
Al	0,549	0,558	0,485	0,366	0,277	0,565	0,565
Fe ³⁺	0,528	0,362	0,465	0,538	0,644	0,182	0,248

Компо- ненты	3/3п ₂	3/3п ₃	3/3п ₄	3/3п ₅	3/3п ₆	3/3п ₇	3/3пк
Cr ₂ O ₃	39,47	39,48	37,76	38,45	36,90	37,72	29,17
Al ₂ O ₃	13,60	12,91	11,37	13,40	7,53	5,83	2,81
Fe ₂ O ₃	15,11	15,81	18,73	17,64	25,12	25,19	37,35
TiO ₂	0	0	0	0	0	0	0
MgO	0	0	0	1,53	1,06	0	0
FeO	25,71	25,25	26,37	22,50	23,86	26,46	26,41
MnO	2,20	2,97	2,92	1,96	3,28	2,43	1,94
ZnO	3,05	2,85	2,08	3,60	2,55	1,88	1,82
Сумма	99,14	99,27	99,23	99,08	100,30	99,51	99,50

Формульные единицы в расчете на три катиона

Mg	—	—	—	0,077	0,055	—	—
Fe ²⁺	0,734	0,724	0,774	0,632	0,673	0,795	0,811
Mn	0,064	0,086	0,086	0,056	0,098	0,074	0,060
Zn	0,202	0,190	0,140	0,235	0,174	0,131	0,129
Ti	—	—	—	—	—	—	—
Cr	1,065	1,071	1,039	1,023	1,025	1,072	0,846
Al	0,547	0,521	0,466	0,531	0,311	0,247	0,122
Fe ³⁺	0,388	0,418	0,495	0,446	0,664	0,681	1,032

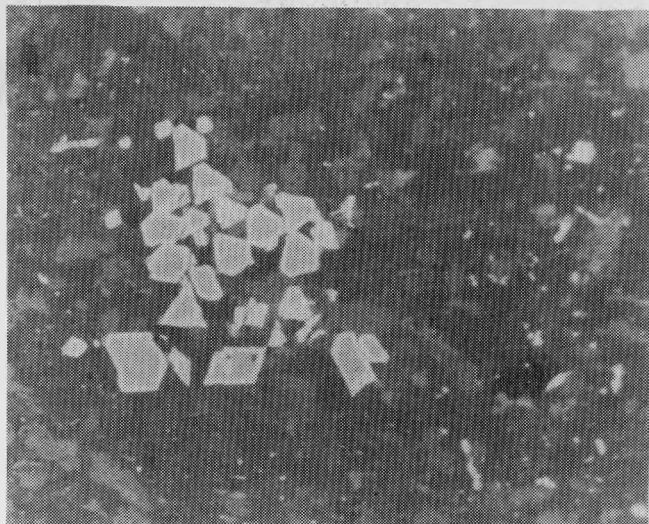


Рис. 1. Пикрито-базальты (обр. 4)

Скопление микровкрапленников хромшпинелидов: серая ядро — титанистый алюмохромит, светлая кайма — марганцовистый хромтитаномагнетит; увел. 280

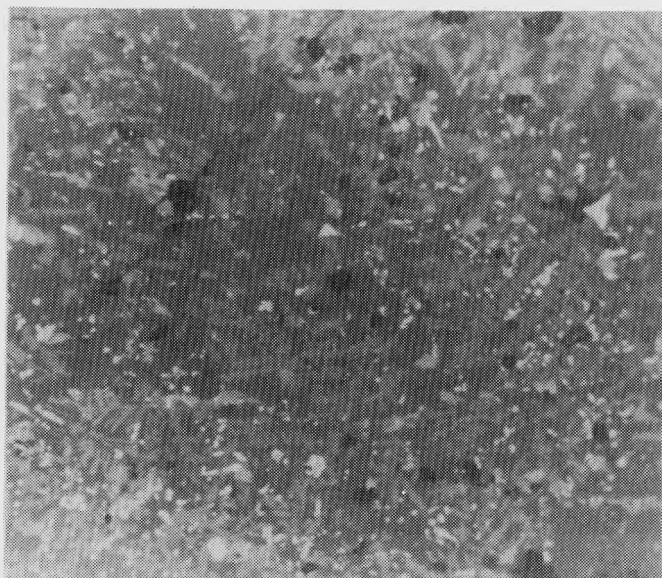


Рис. 2. Щелочные оливиновые базальты (обр. 6)

Скелетные кристаллы ферроавгита (серое), титанавгита (более светлое), титанистого и цинкистого хромгерцинита (белое) в полевошпатовой массе (темно-серое); черное — микроинцдалины хлорита; увел. 160

таву к фассаиту, содержание "молекулы" Чермака CaAlAlSiO_6 в минерале превышает 10%, а титанистого аналога "молекулы" Чермака CaAlAlTiO_6 [27] составляет около 8%. Наиболее железистый ферроавгит 6/5 отличается заметной примесью калия. В подчиненном количестве в щелочных оливиновых базальтах аксуйской свиты развит высоко- и крайне высокотитанистый ферроавгит (табл. 8, ан. 6/6) (f74,9). Титанавгит слагает внешние зоны зональных скелетных кристаллов ферроавгита, а чаще обособленные мелкие пластинчатые выделения длиной до 80 мк и шириной до 15 мк

Таблица 7

Химический состав (в мас. %) хромшпинелидов зональных и незональных микрокрупленников в пикритовых базальтах (5) и щелочных оливиновых базальтах (6) аксуйской свиты Северного Казахстана

Компоненты	Зональный		Зональный					Незональный	Зональный		
	5/1я	5/1к	5/2я	5/2п ₁	5/2п ₂	5/2п ₃	5/2к	6/1	6/2я	6/2п	6/2к
Cr ₂ O ₃	27,20	27,57	30,08	28,48	27,67	28,16	26,50	26,77	27,61	27,52	26,54
Al ₂ O ₃	22,89	15,05	21,95	22,05	22,14	20,69	18,19	20,37	21,17	20,87	18,66
Fe ₂ O ₃	11,54	18,61	10,88	12,11	11,86	12,41	13,61	11,63	11,42	10,28	12,34
TiO ₂	3,12	2,52	3,37	3,37	3,39	3,49	4,05	3,87	3,07	3,81	3,64
MgO	5,77	1,23	8,79	8,28	7,16	6,46	2,44	3,02	2,37	2,54	0
FeO	28,98	33,94	24,95	25,50	26,96	27,71	31,72	32,92	33,41	33,86	35,31
MnO	0,50	0,49	0	0,22	0,26	0,50	1,19	0,83	0,97	0,72	0,46
ZnO	0	0	0	0	0	0	1,65	0	0	0	2,24
Сумма	100,02	99,41	100,01	100,01	99,44	99,42	99,35	99,41	100,01	99,60	95,55

Формульные единицы в расчете на три катиона

Mg	0,278	0,064	0,417	0,394	0,345	0,315	0,124	0,151	0,118	0,127	—
Fe ²⁺	0,784	0,989	0,664	0,681	0,730	0,757	0,904	0,922	0,932	0,948	1,024
Mn	0,014	0,014	—	0,006	0,007	0,014	0,034	0,024	0,027	0,020	0,014
Zn	—	—	—	—	—	—	0,042	—	—	—	0,057
Ti	0,076	0,067	0,081	0,081	0,082	0,086	0,104	0,097	0,077	0,095	0,095
Cr	0,696	0,760	0,756	0,719	0,707	0,728	0,713	0,708	0,728	0,729	0,726
Al	0,872	0,618	0,822	0,829	0,840	0,795	0,730	0,805	0,831	0,822	0,762
Fe ³⁺	0,281	0,488	0,261	0,291	0,289	0,305	0,349	0,293	0,287	0,259	0,322

Таблица 8

Химический состав авгита, ферроавгита, титанаугита щелочных оливиновых базальтов аксуйской свиты

Компоненты	Авгит		Ферроавгит				Титанаугит	
	6/3*		6/4		6/5		6/6*	
	мас. %	форм. ед.	мас. %	форм. ед.	мас. %	форм. ед.	мас. %	форм. ед.
SiO ₂	42,48	1,624	48,90	1,847	42,02	1,654	36,94	1,464
TiO ₂	2,76	0,079	Следы	—	1,25	0,037	14,38	0,429
Cr ₂ O ₃	0	—	0	—	0	—	0,04	0,001
Al ₂ O ₃	12,74	0,573	7,51	0,334	7,66	0,355	15,18	0,709
FeO	14,40	0,461	21,75	0,687	27,69	0,911	9,70	0,322
MnO	0,31	0,010	Следы	—	Следы	—	0,27	0,009
MgO	8,83	0,503	10,65	0,600	9,48	0,557	1,86	0,110
CaO	17,97	0,736	13,14	0,532	11,15	0,470	21,21	0,901
Na ₂ O	0,17	0,013	Следы	—	Следы	—	0,71	0,055
K ₂ O	—	—	—	—	0,31	0,016	—	—
Сумма	99,66	4	101,95	4	99,56	4	100,29	4
<i>f</i>	48,4		53,4		62,1		74,9	

* Аналитик Э.М. Спиридонов.
Примечание. Микросонд "Самбах", аналитик Д.М. Дашевская.

Таблица 9

Химический состав (в мас. %) хромшпинелидов зональных и незональных микровкрапленников в базальтовых коматитах (7), марьянитах (8) и бонинитах (9) аксуйской свиты Северного Казахстана

Компоненты	Зональные									
	7/1я	7/1п ₁	7/1п ₂	7/1п ₃	7/1п ₄	7/1п ₅	7/1к	7/2я	7/2п ₁	
Cr ₂ O ₃	32,62	31,56	32,70	31,15	35,69	29,16	3,88	31,16	30,92	
Al ₂ O ₃	28,13	27,59	26,85	26,47	15,52	2,47	1,67	29,15	28,82	
Fe ₂ O ₃	8,30	9,86	9,21	11,38	17,35	37,31	63,03	9,19	9,67	
MgO	10,21	9,94	9,26	9,53	5,31	1,93	1,02	11,34	11,04	
FeO	20,77	20,86	21,86	21,49	26,14	28,78	29,55	19,18	19,57	
MnO	0	0,21	0,13	0	0	0	0	0	0	
Сумма	100,02	100,02	100,02	100,02	100,01	99,65	99,15	100,02	100,02	
Формульные единицы в расчете на три катиона										
Mg	0,467	0,457	0,429	0,441	0,266	0,106	0,058	0,513	0,501	
Fe ²⁺	0,533	0,538	0,568	0,559	0,734	0,894	0,942	0,487	0,499	
Mn	—	0,005	0,003	—	—	—	—	—	—	
Cr	0,792	0,769	0,803	0,765	0,948	0,850	0,117	0,748	0,745	
Al	1,017	1,002	0,982	0,968	0,614	0,104	0,075	1,042	1,034	
Fe ³⁺	0,192	0,229	0,215	0,266	0,438	1,043	1,808	0,210	0,222	

Примечание. Микросонд "Самбах", аналитик Д.М. Дашевская; Ti, Ca, Si, Zn не обнаружены.

в цементирующей массе щелочных оливиновых базальтов. В проходящем свете титанавгит бурого и темно-бурого цвета, в отраженном свете заметно светлее ферроавгита (см. рис. 2) и напоминает ильменит. Титанавгит содержит от 3,5 до 21%, в среднем около 14% TiO_2 , вероятно, это наиболее титанистый клинопироксен базальтоидов Земли.

Максимальные содержания титана, известные в щелочных базальтоидах [24] и в щелочных габброидах [5], составляют соответственно 7 и 9% TiO_2 . Титанавгит щелочных базальтов аксуйской свиты содержит до 40% минала $CaAlAlTiO_6$ и около 15% минала $CaAlAlSiO_6$. Из-за малых размеров выделений титанавгита измерить его показатели преломления и получить рентгенограмму не удалось.

Хромшпинелиды в щелочных оливиновых базальтах слагают мелкие и мельчайшие выделения (до долей микрона), рассеянные во всем объеме пород, преимущественно не в вариолях, а в меланократовой цементирующей массе в ассоциации с ферроавгитом и титанавгитом. Хромшпинелиды представлены незональным и чаще зональным марганцевисто-титанистым хромгерцинитом, бедным магнием (табл. 7, ан. 6/1, 6/2я-п), с каймами цинкисто-титанистого хромгерцинита (ан. 6/2к).

Высокомагнезиальные, низкощелочные, низкокальциевые, бедные титаном и крайне бедные фосфором вулканиды серии базальтовые коматииты-марианиты-бониниты развиты в верхах аксуйской свиты. Эти вулканиды обладают целым рядом сходных геохимических черт — они обогащены Cr, Ni, Co, Zn и резко обеднены Zr и Ba (см. табл. 1, ан. 7-9). Подобные геохимические особенности характерны и для неметаморфизованных марианитов — бонинитов современных и третичного возраста [4]. Обильные мелкие выделения хромшпинелидов приурочены обычно к выделениям оливина (псевдоморфозам серпентина по оливину), выделения оливина иногда имеют скелетную форму. Состав хромшпинелидов во всех этих вулканидах сходен, они не содержат титан и цинк, весьма бедны марганцем, обычно богаты и очень богаты магнием и алюминием

Зональные

7/2п ₂	7/2п ₃	7/2п ₄	7/2к	7/3я	7/3к	7/4я	7/4п ₁	7/4п ₂	7/4к
31,07	28,97	40,52	25,01	32,08	31,92	28,01	28,79	28,94	32,02
28,86	25,97	15,28	3,19	28,87	28,62	32,30	30,37	28,25	4,46
9,22	14,50	12,91	41,03	8,52	8,68	10,22	11,76	12,93	33,57
10,59	10,12	6,08	2,23	11,22	10,63	14,16	14,29	12,14	4,39
19,99	20,30	24,82	27,78	19,33	20,09	15,33	14,80	17,75	25,56
0,28	0,16	0	0,75	0	0	0	0	0	0
100,02	100,02	99,61	100,00	100,02	99,94	100,02	100,02	100,02	100,00

Формульные единицы в расчете на трикатиона

0,482	0,469	0,304	0,122	0,508	0,484	0,622	0,632	0,549	0,234
0,511	0,527	0,696	0,854	0,492	0,516	0,378	0,368	0,451	0,766
0,007	0,004	—	0,023	—	—	—	—	—	—
0,750	0,711	1,071	0,727	0,771	0,771	0,653	0,676	0,695	0,907
1,038	0,950	0,603	0,138	1,034	1,029	1,121	1,061	1,010	0,188
0,212	0,339	0,326	1,135	0,195	0,200	0,226	0,263	0,295	0,905

Таблица 9 (окончание)

Компоненты	Зональный			Незональ- ный	Зональный				
	8/1я	8/1п	8/1к		8/2	8/3я	8/3п ₁	8/3п ₂	8/3п ₃
Cr ₂ O ₃	31,37	31,29	7,48	56,60	29,67	27,44	31,08	35,30	27,09
Al ₂ O ₃	28,77	1,17	0	7,65	31,61	31,38	28,65	23,03	17,56
Fe ₂ O ₃	9,27	36,85	61,48	7,61	9,50	11,90	10,10	11,25	24,75
MgO	11,04	1,92	0,12	9,49	14,47	14,20	11,77	9,61	7,27
FeO	19,58	28,30	30,98	18,64	14,76	15,10	17,82	20,84	23,34
MnO	0	0,47	0	0	0	0	0,60	0	0
Сумма	100,02	99,99	100,06	100,00	100,02	100,02	100,02	100,02	100,01

Формульные единицы в расчете на три катиона

Mg	0,501	0,106	0,007	0,476	0,636	0,626	0,532	0,451	0,357
Fe ²⁺	0,499	0,879	0,993	0,524	0,364	0,374	0,453	0,549	0,643
Mn	—	0,015	—	—	—	—	0,015	—	—
Cr	0,756	0,919	0,227	1,505	0,692	0,642	0,746	0,879	0,705
Al	1,032	0,051	—	0,303	1,097	1,093	1,024	0,854	0,681
Fe ³⁺	0,212	1,030	1,773	0,193	0,211	0,265	0,230	0,267	0,614

(табл. 9). Ранние незональные выделения сложены высокомагниевым хромитом, содержащим более 56% Cr₂O₃ (ан. 8/2, 9/1). Выделения более поздних хромшпинелидов обычно резко зональные, изредка наблюдаются незональные мельчайшие выделения хромшпинелидов (ан. 9/3, 9/4), состав которых аналогичен составу ядер зональных выделений. В базальтовых коматитах ядра зональных выделений хромшпинелидов сложены богатой Fe²⁺ хромшпинелью (ан. 7/2–7/4), реже богатым Mg хромгерцинитом (ан. 7/1), не содержащими марганца; промежуточные зоны – хромгерцинитом, затем хромитом (ан. 7/1п₄, 7/2п₄), содержащими менее 0,3% MnO, узкие внешние зоны – феррихромитом (ан. 7/4к) и хроммагнетитом (ан. 7/1п₅, 7/1к, 7/2к); в ходе кристаллизации резко возрастало содержание Fe³⁺, заметно – Fe²⁺, существенно снижалось – Mg, Al. В марианитах центральные части зональных выделений хромшпинелидов сложены железистой хромшпинелью (ан. 8/1я, 8/3я, 8/3п_{1,2}), промежуточные зоны – магнезиальным алюмохромитом (8/3п₃), внешние зоны – магнезиальным ферриалюмохромитом (8/3к), хроммагнетитом (8/1п, 8/1к); максимальное содержание марганца 0,6% MnO; в ходе кристаллизации резко возрастало содержание Fe³⁺, заметно возрастало Fe²⁺, заметно снижалось – Al и Mg. В бонинитах ядра зональных выделений и незональные зерна хромшпинелидов сложены железистой хромшпинелью (*f* 40–49) (ан. 9/2я–п, 9/3, 4), реже магнезиальным хромгерцинитом (9/5я), внешние зоны – алюмохромитом (9/2к) и хроммагнетитом (9/5к), содержания марганца в шпинелидах менее 0,2% MnO; в ходе кристаллизации заметно возрастало содержание Fe³⁺ и Fe²⁺, снижалось – Mg и Al.

Незональный	Зональный			Незональный		Зональный	
	9/1	9/2я	9/2п	9/2к	9/3	9/4	9/5я
56,35	29,36	29,36	30,69	30,48	31,13	30,63	26,70
8,27	31,41	30,88	13,34	31,30	28,97	29,22	3,12
6,41	9,58	10,18	25,15	7,82	9,35	8,87	28,89
8,15	13,58	13,55	6,70	12,20	11,19	9,90	2,01
20,82	16,09	16,05	23,63	18,22	19,38	21,22	39,26
0	0	0	0	0	0	0,19	0
100,00	100,02	100,02	100,01	100,02	100,02	100,02	100,00

Формульные единицы в расчете на три катиона

0,411	0,601	0,601	0,336	0,544	0,507	0,452	0,111
0,589	0,399	0,399	0,664	0,456	0,493	0,543	0,889
—	—	—	—	—	—	0,005	—
1,507	0,689	0,690	0,816	0,721	0,749	0,742	0,777
0,330	1,097	1,082	0,548	1,103	1,037	1,054	0,135
0,163	0,214	0,228	0,636	0,176	0,214	0,205	1,088

ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА ХРОМШПИНЕЛИДОВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ УЛЬТРАОСНОВНЫХ ВУЛКАНИТОВ СЕВЕРНОГО КАЗАХСТАНА

Раннегеосинклинальные вулканы ультраосновного и близкого состава принадлежат двум сериям — низкощелочной (авгититы, базальтовые коматииты, марианиты, бониниты) и щелочной (щелочные пикриты, пикрито-базальты и оливиновые базальты). Хромшпинелиды низкощелочных вулканидов бедны и очень бедны титаном, марганцем, цинком, относительно бедны Fe^{3+} , обогащены хромом (а авгититах 56–62% Cr_2O_3 , в коматиитовых базальтах — бонинитах до 57% Cr_2O_3) и магнием (в авгититах и коматиитовых базальтах до 15%, в марианитах до 14,5%, в бонинитах до 13,5% MgO). Хромшпинелиды щелочных вулканидов колчеданосной среднеаксуйской серии обогащены титаном (до 17% TiO_2 в пикритах, до 9% в пикрито-базальтах, до 4% в оливиновых базальтах), марганцем (до 5% MnO), цинком (до 3,5% ZnO) и Fe^{3+} ; средние и максимальные содержания хрома (до 45% Cr_2O_3) и магния (до 12% MgO) в них заметно ниже, чем в хромшпинелидах низкощелочных ультрамафитов.

Достаточно отчетливо прослеживается зависимость состава хромшпинелидов от состава вулканидов: в собственно ультрамафитах (пикриты, авгититы) развиты в основном хромит и магнезиохромит, в базальтоидах — в основном хромистые шпинель и герцинит; в хромшпинелидах щелочных вулканидов максимальные содержания хрома и магния снижаются от пикритов (до 45% Cr_2O_3 и 12% MgO) к пикрито-базальтам (до 44% Cr_2O_3 и 8% MgO) и оливиновым базальтам (до 30% Cr_2O_3 и 4% MgO).

СРАВНЕНИЕ АКЦЕССОРНЫХ ХРОМШПИНЕЛИДОВ МАГМАТИТОВ СЕВЕРНОГО КАЗАХСТАНА И ДРУГИХ РЕГИОНОВ

Хромшпинелиды вулканических ультрамафитов. Интересно сравнить состав хромшпинелидов наших вулканических ультрамафитов и вулканических и плутонических ультрамафитов.

Хромшпинелиды низкощелочных пикритов и меймечитов представлены обычно хромшпинелью с 0,24% TiO_2 и 0,15% MnO , крайне бедной Fe^{3+} [1, 2, 23]. Хромшпинелиды пикритов щелочных и субщелочных ассоциаций представлены феррихромитом, алюмохромитом, алюмомагнезиохромитом, хромтитаномагнетитом со средними содержаниями 4,07% TiO_2 и 0,90% MnO [1, 3, 8, 23], хромшпинелиды коматиитов — магнезиохромитом ($> 50\% Cr_2O_3$) с 0,28% TiO_2 и 0,15% MnO , весьма бедным Fe^{3+} [23], акцессорные хромшпинелиды дунитов альпинотипных массивов — в основном магнезиохромитом (частота встречаемости около 90%) с 0,11% TiO_2 и 0,17% MnO [1, 9, 11, 17, 21, 23]. В альпинотипных дунитах щучинского комплекса E_{1-2} Северного Казахстана, по нашим данным, развит магнезиохромит (Cr_2O_3 51–53%, Fe_2O_3 4–8%), титан и марганец в нем не обнаружены, ассоциирующий оливин — по составу почти чистый форстерит $Fe_{2,4}$. Акцессорные хромшпинелиды дунитов расслоенных толеитовых интрузивов (типа Бушвельда и Стиллуотера) представлены хромшпинелью и феррихромитом, которые в среднем содержат 0,56% TiO_2 и 0,22% MnO [19, 21, 23], в дунитах щелочных интрузивных ассоциаций — ферримагнезиохромит и феррихромит с 4,87% TiO_2 и 0,39% MnO [1, 3, 21, 23]. В гарцбургитах альпинотипных массивов развиты магнезиохромит (60%) и хромшпинель (40%) с 0,09% TiO_2 и 0,18% MnO , в гарцбургитах щелочных ассоциаций — магнезиохромит и хромшпинель с 1,07% TiO_2 и 0,24% MnO в среднем. В лерцолитах и близкого состава перидотитах в альпинотипных массивах развиты акцессорные магнезиохромит (25%), хромшпинель (65%) и хромит (10%) с 0,11% TiO_2 и 0,15% MnO , в расслоенных толеитовых интрузивах — алюмомагнезиохромит, алюмохромит, хромит, феррихромит с 1,27% TiO_2 и 0,44% MnO [1, 9, 11, 17, 21, 23].

Хромшпинелиды низкощелочных авгититов кварцитогорской свиты Северного Казахстана по составу близки к хромшпинелидам альпинотипных гипербазитов и коматиитов, тренд их эволюции (рост Fe^{2+} , снижение Mg , см. табл. 2) сходен с трендом рудных хромшпинелидов; в отличие от альпинотипных хромшпинелидов авгититов иногда обогащены цинком.

Хромшпинелиды пикритов и туфов пикритов урумбайской свиты по составу и эволюции состава резко отличны от ультрамафитов альпинотипных и расслоенных толеитовых интрузивов, резко отличен и состав оливинов в наших пикритах и альпинотипных гипербазитах, что свидетельствует о различных магматических источниках тех и других пород. Хромшпинелиды раннегеосинклинальных щелочных пикритов Северного Казахстана по составу и эволюции состава близки к пикритам щелочных и субщелочных ассоциаций, особенно к пикритоидам никеленосных интрузивов Печенги [8]; для тех и других характерны высокие содержания марганца — до 5% MnO . В каледонидах Северного Казахстана известны интрузивные аналоги щелочных пикритов урумбайской свиты, возраст их — верхи кембрия или низы ордовика.

Указанные выше данные позволяют высказать предположение о возможной никеленосности интрузивных аналогов щелочных пикритов. Особенностью хромшпинелидов колчеданоносной урумбайской свиты являются высокие содержания цинка (до 3,5% ZnO) в их поздних генерациях. В никеленосном поясе Томпсон в Канаде цинкистый хромгерцинит и цинкистый хромит ассоциируют с хромшпинелью и слюдой во включениях в пирротин-пентландитовых рудах.

Хромшпинелиды вулканических ультрамафит-мафитовых пород. По особенностям состава и эволюции состава хромшпинелидов и петрологическим особенностям базиты океанических и околоокеанических структур, складчатых областей принадлежат трем сериям: толеитов океанического дна и срединно-океанических хребтов (низкощелочные и низкотитанистые вулканиты); известково-щелочных островодужных; щелочных оливиновых базальтов-океанитов (высокотитанистые вулканиты).

Хромшпинелиды толеитов океанического дна и толеитов офиолитовой серии по составу близки к хромшпинелидам альпинотипных гипербазитов, это магнезиохромит, алюмомагнезиохромит, алюмохромит, хромшпинель, хромит, относительно бедные Fe^{3+} , содержащие менее 0,7% TiO_2 (обычно менее 0,4%) и менее 0,5% MnO (обычно менее 0,3%) [1, 2, 7, 10, 23, 25, 26]. Базальтоиды островодужных серий (как и габброиды расчлененных толеитовых интрузивов) содержат хромшпинелиды с повышенным количеством Fe^{3+} , образующие по составу непрерывный ряд от хромита, магнезиохромита, хромгерцинита (реже хромшпинели, феррихромита) до хромтитаномагнетита (или хромальвошпинели), содержания титана колеблются от 0,5 до 25% TiO_2 , MnO — от 0,2 до 0,7% [1, 2, 10, 21, 23, 25]. Хромшпинелиды щелочных оливиновых базальтов по составу и эволюции состава близки к островодужным, отличаясь повышенными содержаниями титана в ранних генерациях хромшпинелидов и марганца (до 1,4% MnO) в их поздних генерациях.

Хромшпинелиды пикритовых и оливиновых базальтов шункырашинской и аксуйской свит Северного Казахстана резко отличны от хромшпинелидов офиолитовых толеитов и близки по составу и эволюции состава к хромшпинелидам серии высокотитанистых щелочных оливиновых базальтов (океанитов). Особенностью хромшпинелидов колчеданоносной аксуйской свиты является повышенное содержание цинка, до 2% ZnO .

Хромшпинелиды ранней генерации в базальтовых коматитах, марианитах, бонититах аксуйской свиты по составу отвечают хромитам типичных коматитов по [1, 23]. Преобладающие в этих вулканитах хромшпинелиды ряда хромшпинель → хромгерцитин → хромит → феррихромит → хроммагнетит без титана и марганца не имеют аналогов.

ОБ УСЛОВИЯХ ОБРАЗОВАНИЯ ХРОМШПИНЕЛИДОВ ВУЛКАНИТОВ СЕВЕРНОГО КАЗАХСТАНА

Для большинства зональных хромшпинелидов базальтоидов любого типа, пикритов, кимберитов, магматических рудных месторождений, базальтоидов Луны установлена однотипная эволюция состава: в ходе кристаллизации снижается содержание Mg , Al , Si и возрастает — Fe^{3+} , Fe^{2+} , Ti , Mn [1–3, 7–11, 14, 15, 19, 21, 23, 25, 26].

Вероятно, такая общая зависимость должна быть обусловлена какой-то единой и простой причиной. По экспериментальным данным [23], указанная эволюция обусловлена снижением температуры базальтоидных расплавов (и реакцией вкрапленники–расплав).

Раннегеосинклинальные вулканиды Северного Казахстана содержат ассоциацию низкохромистых клинопироксенов и высокохромистых шпинелей, т.е. формировались при относительно низких давлениях [20].

Пикриты урумбайской свиты. По [6], при снижении температуры равновесия $K = (Fe/Mg)_{\text{оливин}} : (Fe/Mg)_{\text{хромшпинелид}}$ увеличивается: в альпинотипных дунитах $K \leq 0,12$, в плагиоклазовых перидотитах $K \geq 0,14$, в базитах расчлененных толеитовых плутонов — 0,58–0,65. В альпинотипных дунитах Ичкельмесского антиклинария $K = 0,05$. В пикритах урумбайской свиты $K = 0,31$ –0,74, т.е. они — более низкотемпературные образования, чем альпинотипные гипербазиты, и близки к базитам расчлененных плутонов. В соответствии с данными [18, 22], ассоциация хромистого титанмагнетита, содержащего 40–47% минала ульвошпинели, и ильменита, содержащего 13% минала гематита, кристаллизовалась при $900^\circ C$ и $f_{O_2} = 10^{-11}$ атм.

Для вкрапленников хромшпинелидов в оливине пикритов установлен специфический ход кристаллизации — с ростом магнезиальности и содержания Fe^{3+} при снижении железистости и глиноземистости (см. табл. 3, ан.2/3я–3к). Вероятная причина заключается в высокой фугитивности кислорода, что может создать дефицит Fe^{2+} .

Судя по низкой магнезиальности, хромшпинелиды в туфах пикритов являются более низкотемпературными образованиями, чем хромшпинелиды пикритов. Промежуточные зоны вкрапленников хромшпинелидов в туфах пикритов обогащены и Mg и Al по

Таблица 10;

Спектры отражения (R,%) хромшпинелидов в интервале видимого света

Номер образца	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	λ, нм						
	мас.%		400	420	440	460	480	500	520
4/2я	44,2	10,1	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,2	13,1
4/1п ₃	43,0	13,0	13,8	13,8	13,7	13,6	13,5	13,4	13,3
4/1п ₄	33,2	21,9	18,9	19,0	18,8	18,6	18,2	18,0	17,9
4/1п ₅	19,5	31,8	20,5	20,9	21,0	21,0	20,8	20,6	20,4

Примечание. Микрорефлектометр "Блеск", диаметр зонда 10 мк, эталон — металлический кремний, аналитик Т.Н. Чвилева. Номера образцов соответствуют номерам в табл. 1 и 6.

сравнению и с ядерными и с внешними зонами. Возможны две причины этой аномалии: 1) рост температуры, если промежуточные зоны фиксируют момент разогрева при окислении (или по иной причине); 2) распад флогопита, который богат и Mg и Al; второй механизм установлен в ряде кимберлитов [23]. Существенное снижение содержаний титана при кристаллизации хромшпинелидов в туфах пикритов, очевидно, обусловлено массовой кристаллизацией ильменита.

Пикрито-базальты шункырачинской свиты. Резкое снижение содержания марганца на определенной ступени кристаллизации хромшпинелидов (см. табл. 6), вероятно, обусловлено началом кристаллизации марганцовистого ильменита.

Щелочные оливиновые базальты аксуйской свиты. Хромшпинелиды этих пород тесно ассоциируют с титанавгитом, богатым титаном. По экспериментальным данным [27] и природным наблюдениям [24], подобные клинопироксены кристаллизовались при низких давлениях, т.е. близко к поверхности или на ней.

ЗАВИСИМОСТЬ СОСТАВ ХРОМШПИНЕЛИДОВ—ОТРАЖЕНИЕ

Отражение изучено для относительно крупных выделений хромшпинелидов с резкой зональностью и шириной зон не менее 15 мк. Характерные спектры приведены в табл. 10. Отчетливо фиксируется плавное увеличение отражения во всем видимом спектре с ростом содержаний Fe₂O₃ (и FeO) и при снижении содержаний Al₂O₃, MgO, Cr₂O₃. Для хроммагнетита и хромтитаномагнетита установлено наличие небольшого пологого максимума в синей области 420–480 нм, как и у магнетита.

ВЫВОДЫ

1. Состав хромшпинелидов вулканитов Северного Казахстана коррелируется с составом вулканитов. В низкощелочных вулканитах хромшпинелиды резко обеднены титаном и марганцем, обеднены Fe³⁺. В щелочных пикритах хромшпинелиды обогащены марганцем, титаном, цинком, Fe³⁺. Богатые магнием хромшпинелиды характерны для авгитов и вулканитов коматиитовой серии. Вулканические ультрамафиты содержат в основном хромит и магнезиохромит, базальтоиды — хромистые шпинель, герцинит, титаномагнетит.

2. Для богатых титаном и калием щелочных оливиновых базальтов Северного Казахстана характерен парагенез высокожелезистых и высокоглиноземистых клинопироксенов и хромшпинелидов: титанистого авгита и хромгерцинита, иногда и титанавгита (14% TiO₂).

3. Для вулканитов повышенной щелочности характерны следующие эволюции состава хромшпинелидов: в щелочных пикритах → титанистый алюмохромит → титанистый

λ, нм

540	560	580	600	620	640	660	680	700
13,0	12,9	12,8	12,7	12,7	12,6	12,5	12,5	12,4
13,2	13,0	12,9	12,9	12,8	12,8	12,8	12,7	12,7
17,7	17,4	17,1	16,9	16,8	16,5	16,3	16,2	16,0
20,1	19,8	19,4	19,1	19,0	18,6	18,2	18,0	17,7

магнезиохромит → марганцовистый хромтитаномагнетит; в туфах щелочных пикритов — цинкисто-титанисто-марганцовистые алюмохромит → феррихромит → хроммагнетит; в пикрито-базальтах — титанистый алюмохромит → титанистый феррихромит → марганцовистый хромтитаномагнетит; в щелочных оливиновых базальтах — титанистый хромгерцинит → цинкистый хромгерцинит.

4. Высокомагнезиальные и низкощелочные вулканы Северного Казахстана по составу отклоняются от типичных пород коматитовой серии к обычным толеитам. Хромшпинелиды ранней генерации в наших вулканах по составу отвечают хромитам типичных коматитов. Преобладающие в наших вулканах (базальтовых коматитах, марианитах, бонинитах) хромшпинелиды (без титана и марганца) с эволюцией состава хромшпинель → хромгерцинит → хромит → феррихромит → хроммагнетит не имеют аналогов.

5. Хромшпинелиды раннегеосинклинальной колчеданосной вулканической серии Северного Казахстана выделяются повышенными содержаниями цинка (до 4% ZnO).

6. Аналогия состава и эволюции состава хромшпинелидов вулканитов урумбайской свиты и рудоносных интрузивов Печенги позволяет высказать предположение о вероятной никеленосности интрузивных аналогов щелочных пикритов в Северном Казахстане.

ЛИТЕРАТУРА

1. Багдасаров Э.А. Сравнительная характеристика и особенности вариаций состава акцессорных хромшпинелидов // Состав и свойства глубинных пород земной коры и верхней мантии платформ. М.: Наука, 1983. С. 191–221.
2. Багдасаров Э.А., Ланда Э.А., Марковский Б.А. Химический состав и условия кристаллизации хромшпинелидов вулканических ультрамафитов и других пород мафит-ультрамафитового ряда // Зап. Всесоюз. минерал. о-ва. 1979. Ч. 108, № 5. С. 524–535.
3. Васильев Ю.Р., Коненко В.Ф., Королук В.Н. Акцессорные хромшпинелиды из ультраосновных пород Маймеча-Котуйского района // Тр. ИГГ СО АН СССР. 1976. Вып. 305. С. 7–16.
4. Геохимия магматических пород океана и зон сочленения океан–континент. Новосибирск: Новосибирск: Наука, 1984. 185 с.
5. Лебедев П.И., Лебедев А.П. К геохимии титана и ванадия в Западной Сибири // Докл. АН СССР. 1934. Т. 3. № 3. С. 294–300.
6. Маракушев А.А. Петрогенезис и рудообразование. М.: Наука, 1979. 261 с.
7. Муравьева Н.С., Шевалеевский Н.Д., Шербаковский Е.Я. Кристаллизация хромшпинелидов в четвертичных базальтах Исландии // Докл. АН СССР. 1979. Т. 248, № 2. С. 452–457.
8. Нерадовский Ю.Н. Некоторые типоморфные свойства хромшпинелидов в никеленосных ультраосновных породах Печенги // Зап. Всесоюз. минерал. о-ва. 1985. Ч. 114, № 6. С. 698–702.
9. Павлов Н.В. Химический состав хромшпинелидов в связи с петрографическим составом пород ультраосновных интрузивов // Тр. ИГН АН СССР. 1949. Вып. 103. 88 с.
10. Порошин Е.Е., Багдасаров Э.А. Акцессорные хромшпинелиды из нижнекембрийских базальтов Западного Саяна // Геология и геофизика. 1984. № 9. С. 88–97.
11. Соколов Г.А. Хромиты Урала, их состав, условия кристаллизации и закономерности

- распространения // Тр. ИГН АН СССР. 1948. Вып. 97. С. 1–128.
12. Спиридонов Э.М. Геосинклинальные базитовые комплексы Северного Казахстана и их металлогения // Материалы по геологии Центрального Казахстана. М.: Изд-во МГУ, 1980, Т. 19, кн. 1. С. 102–121.
 13. Спиридонов Э.М. Метаморфические комплексы Ишкеольмесского антиклинория и Степнякского синклинория // Проблемы петрологии Казахстана. Алма-Ата: Наука, 1984. Т. 1. С. 161–163.
 14. Францесон Е.В., Розова Е.В. и др. Зональность хромшпинелидов из кимберлитов // Докл. АН СССР. 1985. Т. 280, № 3. С. 742–745.
 15. Фрондель Дж. Минералогия Луны. М.: Мир, 1978. 334 с.
 16. Яшенко Н.Я. Пикриты, меймечиты гор Ичкеульмес и вопросы их генезиса // Изв. АН КазССР. Сер. геол. 1967. № 2. С. 51–56.
 17. Bevan J.C., Rodgers K.A. Electron-probe investigation of some chrome-spinels from of Southern New Caledonia // Miner. Mag. 1977. Vol. 41, N 2. P. 391–394.
 18. Buddington A.F., Lindsley D.H. Iron-titanium oxide minerals and syntetic equivalents // J. Petrol. 1964. Vol. 5. P. 310–357.
 19. Cameron E.N., Glover E.D. Unusual titanian-chromian spinels from the eastern Bushveld complex // Amer. Miner. 1973. Vol. 58, N 3/4. P. 172–188.
 20. Dickey J.S., Yoder H.S. Partitioning of chromium-aluminium between clinopyroxene and spinel // Carnegie Inst. Annu. Rept. Geophys. Lab. Wash. (D.C.), 1972. P. 384–392.
 21. Irvine T.N. Chromian spinel as a petrogenetic indicator. Pt 2 // Canad. J. Earth Sci. 1967. Vol. 4. P. 71–103.
 22. Lindsley D.H. Fe–Ti oxides in rocks as thermometer and oxygen barometers // Carnegie Inst. Wash. Yb. 1963. Vol. 62. P. 60–66.
 23. Oxide minerals. Wash. (D.C.), 1981. 502 p. (Rev. Mineral.; Vol. 3).
 24. Schorer G. Die pyroxene tertiarer Vulcanite des Vogelsberges // Chem. Erde. 1970. Bd. 29, N 2. S. 69–138.
 25. Shizaki K., Yusa V. Chrome-spinels in some basalts Guam, Marian island arc // J. Geol. Soc. Jap. 1977. Vol. 85, N 1.
 26. Sigurdsson N., Senilling J. Spinels in Mid-Atlantic Ridge basalts: chemistry and occurrence // Earth and Planet. Sci. Lett. 1976. Vol. 29, N 1. P. 7–20.
 27. Yagi K., Onuma K. The join $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ – $\text{CaTiAl}_2\text{O}_6$ and its bearing on the titanogites // J. Fac. Sci. Hokkaido Univ. Ser. 4. 1967. Vol. 13, N 4. P. 463–483.

УДК 548.4:549.454

Л.И. ЦИНОБЕР, Л.А. ГОРДИЕНКО

БРАЗИЛЬСКИЕ ДВОЙНИКИ В КРИСТАЛЛАХ СИНТЕТИЧЕСКОГО КВАРЦА

Бразильские двойники в α -кварце представляют собой, как известно, закономерные срастания правого и левого кварца с параллельным расположением осей Z и антипараллельным расположением полярных осей Y в двойниковых индивидах. Они относятся к одному из трех возможных типов двойников кварца с параллельными решетками и к одному из двух (наряду с дофинеийскими двойниками) наиболее распространенных типов двойников в кварце вообще. Широко распространены эти двойники и в кристаллах синтетического кварца, о чем подробнее будет сказано ниже. В последние годы применение метода дифракционного контраста в сочетании с детальным геометрическим анализом структуры кварца позволило построить модель бразильской двойниковой границы и понять условия формирования этих дефектов во время роста кристаллов [1].

МОДЕЛИ ДВОЙНИКОВОЙ ГРАНИЦЫ

К построению модели бразильской двойниковой границы можно подойти двумя путями.

Первый путь, который можно назвать экспериментальным, заключается в следующем. Методом дифракционного контраста с помощью рентгеновской топографии (для макродвойников) или под электронным микроскопом (для микродвойников) исследуется контраст двойниковой границы в различных отражениях. Затем по известной ме-