

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ НИКЕЛЕНОСНОГО ГАББРО-КОРТЛАНДИТОВОГО КОМПЛЕКСА КАМЧАТКИ

Э.Г. Конников, С.Г. Симакин*, Д.А. Орсов**, Е.Г. Сидоров***, В.А. Чубаров***

Институт экспериментальной минералогии РАН, 142432, Московская обл., Ногинский район, Черноголовка, Россия

**Институт микроэлектроники и информатики РАН, 150051, Ярославль, ул. Университетская, 1, Россия*

***Геологический институт СО РАН, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, ба, Россия*

****Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 683006, Петропавловск-Камчатский, бульвар Пуйина, 9, Россия*

Рассмотрены особенности внутреннего строения и соотношение главных разновидностей пород в Кувалорогском габбро-кортландитовом массиве — наиболее крупном интрузиве этой формации на Камчатке. Установлено широкое развитие в интрузивных породах паргаситового амфибола и биотита, а также наличие в ортопироксене ультраосновного состава расплавных включений с порфировыми вкрапленниками паргасита, указывающих на высокое содержание воды в исходном расплаве этой интрузии. По распределению примесных элементов в породах и минералах массива обнаруживается его сходство с никеленосными траппами Сибирской платформы. Некоторые особенности поведения лантаноидов в кортландитах свидетельствуют о выплавлении их родоначальной магмы из гранатосодержащего мантийного субстрата и кристаллизацию в высокобарических условиях. Породы комплекса и все породообразующие минералы Кувалорогского массива деплетированы Ni по отношению к хондриту C1 так же, как продуктивные интрузивы Норильского района, что позволяет высоко оценивать перспективы этого массива на сульфидно-никелевое оруденение.

Распределение элементов-примесей, породы, минералы, деплетированность, никель, габбро-кортландитовый комплекс, рифтогенез.

GEOCHEMISTRY AND FORMATION CONDITIONS OF Ni-BEARING GABBRO-CORTLANDITE COMPLEX ON THE KAMCHATKA PENINSULA

E.G. Konnikov, S.G. Simakin, D.A. Orsoev, E.G. Sidorov, and V.M. Chubarov

The internal structure and proportions of the main rocks of the Kuvalorog gabbro-cortlandite massif, the largest intrusion on the Kamchatka Peninsula, are considered. The intrusive rocks are shown to abound in pargasitic amphibolite and biotite. Ultrabasic orthopyroxene contains melt inclusions with porphyritic pargasite phenocrysts, which point to a high water content in the parental melt of this intrusion. In trace-element patterns of rocks and minerals the massif is similar to Ni-bearing traps of the Siberian Platform. The behavior of lanthanides in the cortlandites evidences that their parental magma was melted out of garnet-bearing mantle substratum and then crystallized under high-pressure conditions. Like the productive intrusions in the Noril'sk district, the rocks and all rock-forming minerals of the Kuvalorog massif are depleted in Ni relative to chondrite C1, which indicates a high Ni-sulfide ore potential of the massif.

Trace-element pattern, rocks, minerals, depletion, nickel, gabbro-cortlandite complex, rifting

В последние годы вновь проявился интерес к освоению промышленных сульфидных никелевых руд, связанных с габбро-кортландитовыми интрузивами в южной части Срединного хребта Камчатки. Вполне понятно, что реализация этого интереса в практике геолого-поисковых и геолого-разведочных работ невозможна без надлежащего уровня общей геологической изученности рудоносного интрузивного комплекса. Значительный объем геологических исследований габбро-кортландитовых интрузий на территории Дальнего Востока был выполнен в 70—80-х годах прошлого века [Зимин, 1973; Вржосек, 1973; Щека, 1975; Байков и др., 1988; Игнатьев и др., 1988], однако вопросы геохимической специализации рудоносных мафит-ультрамафитовых массивов и геодинамических условий их проявления остались за рамками изучения. Цель данной статьи — восполнить образовавшийся пробел в геохимической изученности никеленосных интрузий и полученные новые данные попытаться приложить к проблеме перспектив габбро-кортландитовых интрузий Камчатки на сульфидное оруденение.

Наиболее полно габбро-кортландитовый комплекс Камчатки представлен в Кувалорогском массиве, расположенном на южном окончании Срединного хребта среди черносланцевых отложений хейванской свиты (рис. 1). Этот массив имеет в плане изометрическую форму, площадь выхода на поверхность около 25 км² и наиболее изучен в настоящее время [Щека, 1975; Щека, Чубаров, 1987; Полетаев, 2004]. Он картируется как расслоенный лополит, содержащий в основании кортландиты. Основной объем плутона сложен норитами и габброноритами различной меланократовости. Кортландиты состоят из оливина (15—20 % Fa), бронзита (11—21 % Fs), бурого амфибола (паргасит, роговая обманка, $f = 13—21\%$) и красно-коричневого флогопита ($f = 11—21\%$). Реже в них присутствуют авгит (44—45 % En, 11—12 %

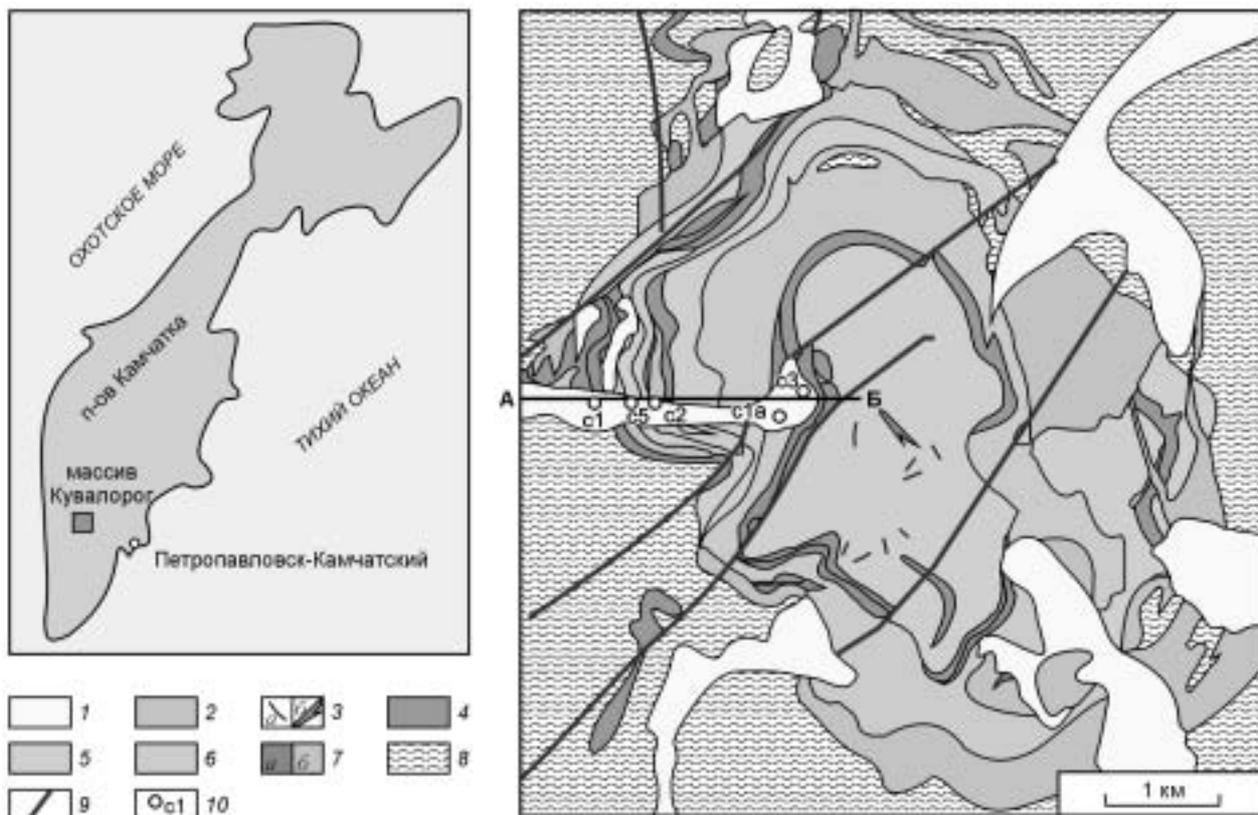


Рис. 1. Местоположение и схема геологического строения габбро-кортландитового массива Кувалорог.

1 — рыхлые отложения, 2 — гранитоиды, 3 — куртландиты: внемасштабные (а) и крупные (б) тела, 4 — роговообманковые пироксениты, 5 — роговообманковые нориты и горнблендиты, 6 — лейконориты и кварцевые диориты, 7 — массивные (а) и вкрапленные (б) сульфидные руды, 8 — силлиманит-ставролит-гранатовые сланцы хейванской свиты, 9 — разломы, 10 — скважины. АБ — профиль буровых скважин.

Fs, 39—40 % Wo) и интеркумулусный лабрадор (60—62 % An). Акцессорные минералы — ильменит, алюмохромит (13—46 % Sp*, 37—51 % Crt, 5—21 % Mt), кобальт-пентландит, пирротин, магнетит. В габброидах главными минералами являются плагиоклаз (46—58 % An), ортопироксен (18—50 % Fs) и обыкновенная роговая обманка ($f = 25—47\%$), соотношения которых широко варьируют, при этом состав пород изменяется от амфибол-плагиоклазовых ортопироксенитов (перкнитов) до амфиболовых лейконоритов и плагиоклазсодержащих горнблендитов. Для норитов и перкнитов очень характерна эвгедральная морфология ортопироксена, что, вероятно, указывает на его раннюю кристаллизацию по отношению к прочим минералам. Роговая обманка в габброидах, как и в куртландитах, формируется на магматическом этапе становления пород. Редкие минералы в норитах — клинопироксен (11—13 % Fs, 40—48 % Wo), биотит ($f = 32—50\%$) и альмандиновый гранат, содержащий до 30 % пиропового минала. Среди акцессориев типичны ильменит, рутил, пирротин, апатит, циркон, монацит.

По мнению большинства исследователей, изучавших Кувалорогский массив, он образовался при двухстадийном поступлении магмы в интрузивную камеру. Судя по тому, что куртландиты в Срединном хребте часто образуют отдельные от габброидов тела, а в Кувалорогском плутоне слагают крупные останцы в габброидах, ультраосновной расплав следует рассматривать в качестве ранней интрузивной

* Sp — шпинелевый, Crt — хромитовый и Mt — магнетитовый миналы алюмохромитов.

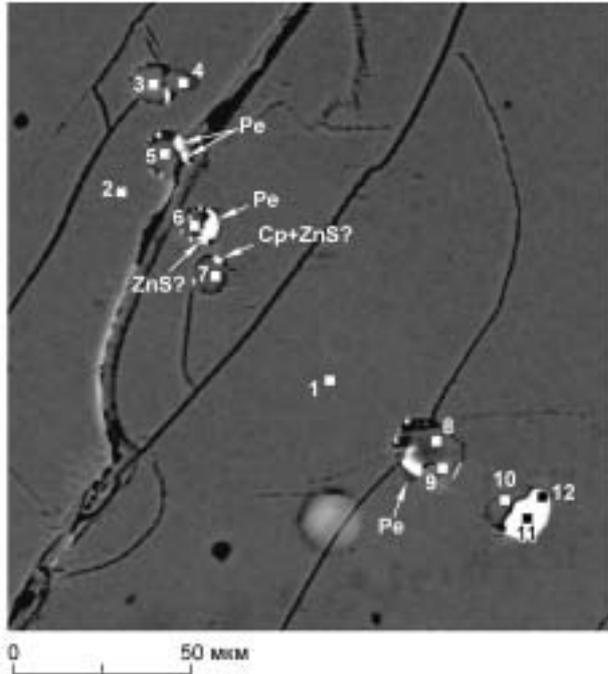


Рис. 2. Изображение в отраженных электронах расплавных включений в ортопироксене из кортландита (обр. КС1-6), CamScan MV 2300.

Точки — места микрозондовых анализов: 1, 2 — ортопироксена, 3, 5—7, 9 — криптозернистых ультраосновных включений, 4, 8, 10 — паргасита, 11 — пирротина, 12 — пентландита. Pe — пентландит, Cr — халькопирит, ZnS — сфалерит.

фазы этого массива. В результате второго импульса базитового расплава и его фракционирования в камере сформировались перкниты, нориты, лейкогаббро и горнблендиты. Становление Кувалорогского массива завершилось внедрением мелких даек спессартитов и керсантитов, представляющих жильную свиту интрузива и содержащих вкрапленники бурой роговой обманки и пироп-альмандинового граната. Дайки обнаружены авторами впервые при передокументации керн скв. 5 и ранее охарактеризованы не были.

Широкое распространение в составе всех пород Кувалорогского массива магматической роговой обманки и биотита указывает на высокое содержание воды в исходном расплаве. Присутствие в

ортопироксене кортландитов включений ультраосновного состава с кристаллами паргасита, биотита и сульфидов Fe, Ni, Co, Cu (рис. 2) доказывает, что на момент кристаллизации пироксена содержание летучих в расплаве превысило 4 мас.% [Barclay, Carmichael, 2004]. По данным минеральных термометров и барометров [Щека, Чубаров, 1987], становление рассматриваемого массива происходило на глубинах порядка 20—26 км ($P=6—8$ кбар) при $T=925—1150$ °C в сильно восстановленной атмосфере ($\log f_{O_2} = -20...-22$).

Давно замеченная приуроченность габбро-кортландитовых интрузий на Дальнем Востоке к крупным дизъюнктивам внутри выступов докембрийских кристаллических пород типа „срединных массивов“ [1] позволяла связывать их становление с раннемеловой тектономагматической активизацией этих структур [Полетаев, 2004]. В последнее время Б.А. Марковским высказано мнение о проявлении ультрамафит-мафитового магматизма в пределах Азиатско-Тихоокеанской окраины в связи с рифтогенезом в поздне-меловое—палеогеновое время [Марковский, 2004]. Однако оба эти представления недостаточно поддержаны достоверными геохронологическими данными и анализом необходимого объема геохимической информации. Недавно авторы двумя независимыми методами получили надежные данные о ранне-палеогеновом (51—57 млн лет) возрасте Кувалорогского массива [Конников и др., 2006]. С целью геохимической характеристики Кувалорогского массива нами были отобраны 17 проб из главных разновидностей его пород, преимущественно из керн буровых скв. 1, 2, 5. Пробы были проанализированы на главные компоненты и на 41 примесный элемент (табл. 1), в том числе лантаноидной группы. Анализы выполнены в Институте проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов (ИПТМ РАН) в Черноголовке и в Аналитическом сертификационном испытательном центре (АСИЦ) ВИМС РАН, Москва. Главные оксиды определялись пламенно-фотометрическим, фотометрическим, титриметрическим и атомно-абсорбционным методами с погрешностью, соответствующей третьей категории точности. Примесные элементы анализировались масс-спектрометрическим и атомно-эмиссионным способом с точностью 0,0n—0,п мкг/г с эталоном „базальт ВМ“ (стандарт СЭВ 2300-80).

Результаты изучения химического состава пород Кувалорогского массива были пересчитаны и нанесены на диаграмму Л.В. Дмитриева (рис. 3), на которой фигуративные точки всех составов образовали единый вытянутый рой, ориентированный по диагонали поля AS. Точки, характеризующие составы кортландитов, легли в начале линии рестирования мантийного субстрата (A), а весь рой вытянулся субпараллельно направлению эволюции состава базальтового расплава при фракционной кристаллизации (B). Это, на наш взгляд, свидетельствует об образовании всей серии пород Кувалорогского плутона в результате кристаллизационной дифференциации базитового расплава.

Суждение о составе исходного расплава этой интрузии помогут составить данные о распределении редких и редкоземельных элементов в породах Кувалорогского массива (см. табл. 1, рис. 4). По нормированным (хондрит C1) содержаниям лантаноидов (см. рис. 4, A) главные разновидности пород массива близки к пикритовым и базальтовым лавам туклонской свиты Норильского района [Lightfoot et al., 1993], которые сингенетичны рудоносным интрузивам. Некоторое отличие наблюдается только по более

Таблица 1.

Содержание главных и примесных элементов в породах Кувалорогского массива

Компонент	C1-17	KV-1	KC1-94	KC1-152	PR107/3	KV-2	C5-410,5	C5-436	P1/1	C2-29	C5-154	C5-208,6	C2-25	C5-377	C5-391	C5-480	C5-417
SiO ₂ , мас.%	50,4	38,0	49,7	51,9	51,5	50,7	53,3	51,9	53,9	50,6	47,1	52,8	45,0	51,42	48,5	45,4	54,0
TiO ₂	0,44	0,4	0,11	0,23	0,33	1,6	0,1	0,62	0,31	0,5	2,2	2,1	2,43	0,51	1,5	1,8	1,0
Al ₂ O ₃	9,0	4,8	4,3	3,8	6,5	12,2	5,3	8,64	20,7	14,6	25,2	17,9	21,2	12,1	17,6	19,5	17,6
FeO _{общ}	8,4	15,7	12,9	11,2	15,7	8,8	14,9	9,8	6,7	12,8	9,0	7,6	14,7	8,8	10,0	10,2	6,3
MnO	0,15	0,16	0,15	0,14	0,24	0,14	0,35	0,22	0,11	0,25	0,19	0,13	0,42	0,2	0,22	0,27	0,13
MgO	21,8	35,4	29,8	29,8	21,6	15,6	17,5	19,4	7,0	10,5	4,5	5,6	4,94	11,8	7,62	7,02	7,32
CaO	3,9	2,9	0,82	0,89	3,2	8,5	3,23	5,0	8,2	5,88	6,7	9,6	6,55	11,8	7,93	9,4	5,88
Na ₂ O	1,6	0,67	0,36	0,31	0,71	2,0	0,55	1,14	2,8	2,15	3,8	3,1	2,34	1,9	3,23	2,46	2,7
K ₂ O	0,26	0,23	0,44	0,48	0,25	0,4	0,45	0,45	0,32	0,45	0,35	0,35	0,40	0,47	0,7	0,35	2,05
П.п.п.	4,08	1,74	1,2	1,0	1,07	0,7	2,6	1,22	0,7	1,1	0,1	0,12	0,10	0,21	1,38	1,98	1,22
Сумма	100	100	99,8	99,75	101,1	100,6	98,3	98,4	100,7	98,8	99,1	99,3	98,0	99,2	98,7	98,4	98,2
Li, г/т	11,2	6,5	5,6	7,0	7,8	5,2	30,9	8,4	11,2	8,0	26,8	9,4	9,2	12,1	14,7	22,6	28
Be	1,3	0,3	0,12	0,21	0,23	0,48	0,6	0,7	1,0	0,8	1,9	1,7	0,8	1,6	1,1	1,2	1,3
B	—	—	—	—	—	—	236	394	—	263	—	—	323	—	374	309	453
Sc	22,3	8,8	4,7	4,9	34,1	42,4	35	40	11,9	35	21,4	28,2	72	58,8	37	35	16
V	91,4	70,3	25,9	40,4	404	337	380	309	154	420	125	274	256	274	396	428	201
Cr	2394	2573	2307	2690	652	1332	800	1313	152	102	85,4	41,7	78	200	157	38	285
Co	138	152	146	126	109	51,3	96	97	31	78	539	35,5	95	47,8	104	103	98
Ni	498	1791	775	755	323	395	113	135	63,8	18	37,1	18,4	14	41,2	83	21	170
Cu	119	378	84,4	80,1	251	108	63,3	80,9	143	29,2	122	47,5	48,9	27,3	152	61	60,5
Zn	101	123	97	82,1	141	69,8	210	126	70,4	191	136	109	127	118	159	133	100
Ga	8,1	4,2	5,1	5,6	6,8	11,4	10,7	11,6	13,2	16,5	16,7	15,7	18,3	11,9	20,5	23,7	16,8
Se	—	—	—	—	—	—	0,2	0,4	—	0,5	—	—	5,0	—	1,4	1,4	0,4
Rb	17,1	5,5	12,9	13,9	13,2	4,8	11	7,8	4,2	9,2	14,7	4,7	5,3	25,3	9,0	2,0	54,8
Sr	223	115	85,4	70,5	107	244	39	274	440	662	860	616	670	340	979	859	776
Y	13,1	12,7	3,1	3,3	11,2	29,9	12,9	15,9	6,6	11	20,5	18,5	164	16,5	26,6	33,7	6,5
Zr	26,2	55,4	33,6	16,5	16,9	109	31,4	39,9	16,4	18,4	35,5	23	98,7	28,8	59	50,8	18,3
Nb	6,5	2,7	1,7	1,6	1,8	3,6	2,3	2,0	2,1	1,5	8,4	9,4	7,2	6,3	3,5	4,4	2,6
Mo	0,48	1,8	0,35	0,42	4,3	0,62	0,2	0,8	1,6	1,7	0,9	1,1	1,0	0,48	0,2	1,2	0,2
Cs	0,87	1,2	1,8	1,9	1,5	0,13	0,7	0,7	0,28	0,6	0,63	0,21	0,4	0,77	0,3	0,4	1,1
Ba	102	48,8	81,6	92,5	69,3	149	93	151	78,7	264	209	122	153	137	228	160	892
La	9,7	6,9	4,8	2,9	6,0	6,4	5,0	4,8	7,7	7,8	6,4	15,4	13,9	7,4	7,4	7,9	9,2
Ce	21,9	18,0	10	6,2	17	18,8	12,6	14,6	19,1	18,8	13,7	45,2	35,8	21,6	21,6	23,2	17,7
Pr	2,9	2,4	1,2	0,77	2,6	3,0	1,8	2,3	2,3	2,7	1,7	6,5	4,9	3	3,6	4,0	2,0

Окончание табл. 1

Компонент	C1-17	KV-1	KC1-94	KC1-152	PR107/3	KV-2	C5-410,5	C5-436	P1/1	C2-29	C5-154	C5-208,6	C2-25	C5-377	C5-391	C5-480	C5-417
Nd	12,6	10,6	4,2	3,0	10,9	15	8,5	10,6	10	12	7,7	29	21,8	14	18,2	19,7	7,6
Sm	1,1	2,6	0,72	0,64	2,5	4,7	2,4	2,9	1,9	2,7	3,6	1,8	6,6	7,0	5,1	7,4	2,9
Eu	0,7	0,94	0,24	0,21	0,57	1,6	0,4	0,6	1,0	1,1	1,6	1,8	1,5	1,0	1,5	1,5	0,9
Gd	3,4	2,9	0,74	0,69	2,5	5,7	2,5	2,7	2,0	2,4	2,5	6,3	10,7	4,5	4,9	5,4	1,5
Tb	0,49	0,43	0,11	0,11	0,31	1,1	0,4	0,5	0,29	0,4	0,46	1,0	2,7	0,7	0,8	0,9	0,2
Dy	3,3	2,7	0,53	0,53	2,3	6,3	2,3	2,7	1,9	1,8	4,3	5,5	21,8	4,7	4,5	5,5	0,9
Ho	0,68	0,5	0,12	0,13	0,45	1,3	0,4	0,6	0,37	0,3	0,97	0,99	5,6	0,93	0,9	1,1	0,2
Er	2,3	1,7	0,36	0,39	1,4	3,7	1,0	1,0	1,0	1,5	3,6	2,6	18	2,6	1,0	1,5	1,0
Tm	0,27	0,21	0,06	0,06	0,18	0,53	0,2	0,2	0,16	0,1	0,47	0,33	3,2	0,35	0,4	0,5	0,08
Yb	2,0	1,3	0,43	0,42	1,6	3,5	1,3	1,5	1,1	1,0	3,6	2,4	21,2	2,5	2,4	3,0	0,7
Lu	0,46	0,23	0,08	0,07	0,27	0,49	0,2	0,2	0,16	0,2	1,0	0,42	3,4	0,52	0,3	0,5	0,1
Hf	1,1	1,3	0,73	0,47	0,63	2,4	0,7	0,9	0,59	0,2	0,48	1,32	0,8	1,3	1,1	1,1	0,3
Ta	1,2	0,4	1,2	1,6	0,36	0,45	0,2	0,1	0,49	0,1	0,73	0,72	0,4	0,44	0,2	0,2	0,2
W	—	0,77	0,35	0,36	0,48	0,37	0,5	0,4	0,73	0,4	—	—	3,6	—	1,0	0,5	0,4
Tl	—	0,06	0,05	0,06	0,07	—	0,05	0,04	—	0,04	—	—	0,02	—	0,04	0,02	0,2
Pb	10,1	4,1	2,5	4,1	5,8	2,8	0,5	2,0	7,2	2,0	7,3	5,7	26	8,4	2,0	2,0	4,0
Th	3,6	0,85	1,4	0,52	0,66	0,89	3,2	0,5	1,0	0,4	1,0	3,7	0,8	0,7	0,2	0,3	1,0
U	1,3	0,35	0,41	0,15	0,89	0,2	0,4	0,1	0,61	0,1	0,09	0,73	0,2	0,18	0,1	0,1	0,4

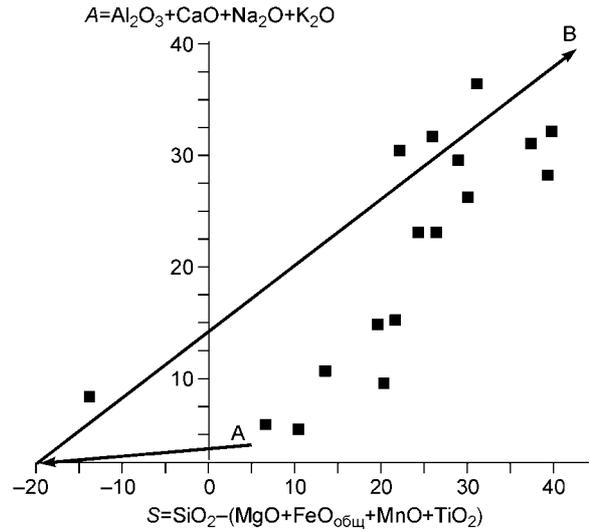
Примечание. C1-17, KV-1, KC1-94, KC1-152 — кортландиты; PR107/3, KV-2 — роговообманковые ортопироксениты (перкниты); C5-410,5 и C5-436 — то же, гранатсодержащие; P1/1, C2-29, C5-208,6 — роговообманковые нориты; C5-154, C2-25 — то же, гранатсодержащие; C5-377 — горнблендит; C5-391 — дайка спессартита, C5-480 — то же, с вкраплениями граната; C5-417 — дайка керсантита; прочерк — содержание элемента ниже предела обнаружения ICP MS-метода.

высокому нормированному содержанию легких редких земель в породах массива и по характеру европиевых аномалий: положительной в туклонских вулканитах и отрицательной в Кувалорогском интрузиве. Зато практически полное совпадение кривых распределения тех и других наблюдается на мультиэлементной диаграмме (см. рис. 4, *Б*). Особенно примечательным является наличие резкой отрицательной аномалии никеля по отношению к примитивной мантии как в габбро-кортландитовой интрузии Камчатки, так и в туклонских траппах. Эта аномалия очевидно связана с тем, что существенная часть этого элемента была удалена из исходной магмы в сульфидную фазу. Показательным является также обогащенность Ва, U, Sr сравниваемых магматитов на фоне их обедненности малоподвижными элементами — Th, Nb, Zr, Sc, что может указывать на высокую степень плавления мантийного субстрата и метасоматическую переработку его глубинным флюидом.

Кроме геохимических особенностей пород также было изучено распределение 18 примесных элементов в главных породообразующих минералах Кувалорогского массива (табл. 2). Химический состав этих минералов приведен по рентгеноспектральным данным (аналитик А.Н. Некрасов, ИЭМ РАН, г. Москва), а содержание в них редкоземельных элементов — по результатам вторичной ионной масс-спектрометрии на ионном микроанализаторе IMS-4f в Институте микроэлектроники и информатики РАН, г. Ярославль (аналитики С.Г. Симакин и Е.В. Потапов). Нормирование по хондриту концентраций лантаноидов показало (рис. 5, *А*), что минералы кортландитов наиболее бедны этими элементами. В оливине кортландитов содержание РЗЭ самое низкое, на пределе чувствительности метода и, по-видимому, поэтому крайне законономерное. Вместе с тем намечается отчетливое повышение нормативных концентраций к тяжелым лантаноидам, если не принимать во внимание аномальный пик La. Отчетливо этот тренд проявлен в ортопироксене кортландитов, что сближает их с энстатитом из метеорита Акапулько и шпинелевыми лерцолитами глубинных ксенолитов [Леснов, 2001а].

Рис. 3. Диаграмма Л.В. Дмитриева и положение на ней фигуративных точек химического состава пород Кувалорогского массива.

А и В — тренды вариаций состава мантийных респитов и фракционной кристаллизации соответственно.



Некоторые авторы полагают, что обогащение ортопироксена тяжелыми лантаноидами связано с его образованием за счет разложения граната [Vannicci et al., 1993]. По данным Ф.П. Леснова, изучавшего влияние летучих на распределение РЗЭ, такой же эффект вызывает присутствие в магме восстановленного флюида, в особенности СО. В отличие от ультрамафитов, ортопироксен в перкнитах и норитах существенно богаче РЗЭ (10—15 хондритовых норм), и они распределяются пропорционально содержаниям в хондрите (см. рис. 5, В). В этом отношении он сходен с ортопироксенами габброноритов Рыбинского массива в Кузнецком Алатау [Леснов, 2001а]. Уровень нормированных содержаний РЗЭ в ортопироксене норитов Кувалорога даже выше, чем парагенного с ним плагиоклаза. Это, вероятно, связано с более ранней кристаллизацией ортопироксена в перкнитах, в которых плагиоклаз выделяется из захороненного в кумулусе порового расплава, уже истощенного РЗЭ. По характеру кривой их распределения плагиоклаз перкнитов аналогичен габброидам комплекса Ивреа-Вербано [Леснов, 2001б], которая имеет ярко выраженный отрицательный наклон на диаграмме и резкую положительную аномалию Eu. Интересно, что нормированная кривая распределения лантаноидов в норитах, кристаллизующихся из расплава той же интрузивной фазы, комплементарна к таковой плагиоклаза амфиболовых пироксенитов, имеет европиевый минимум и практически совпадает с линией, характеризующей распределение РЗЭ в амфиболе норитов. Роговые обманки как в кортландитах, так и в базитах Кувалорогского плутона являются максимальными концентраторами элементов-примесей лантаноидной группы. Сближенность кривых распределения РЗЭ в плагиоклазах и амфиболах норитов, по мнению Ф.П. Леснова, свидетельствует о равновесной кристаллизации этих минералов.

Характер распределения лантаноидов в гранате из гибридных кварцевых норитов и диоритов массива (см. рис. 5, В) не отличается от такового в этом минерале из метаморфических пород [Скублов, Другова, 2004]. Профиль распределения РЗЭ и наличие в гранатах глубокого Eu минимума тоже сближает Кувалорогский интрузив с высокобарическими габброидами комплекса Ивреа-Вербано [Леснов, 2002].

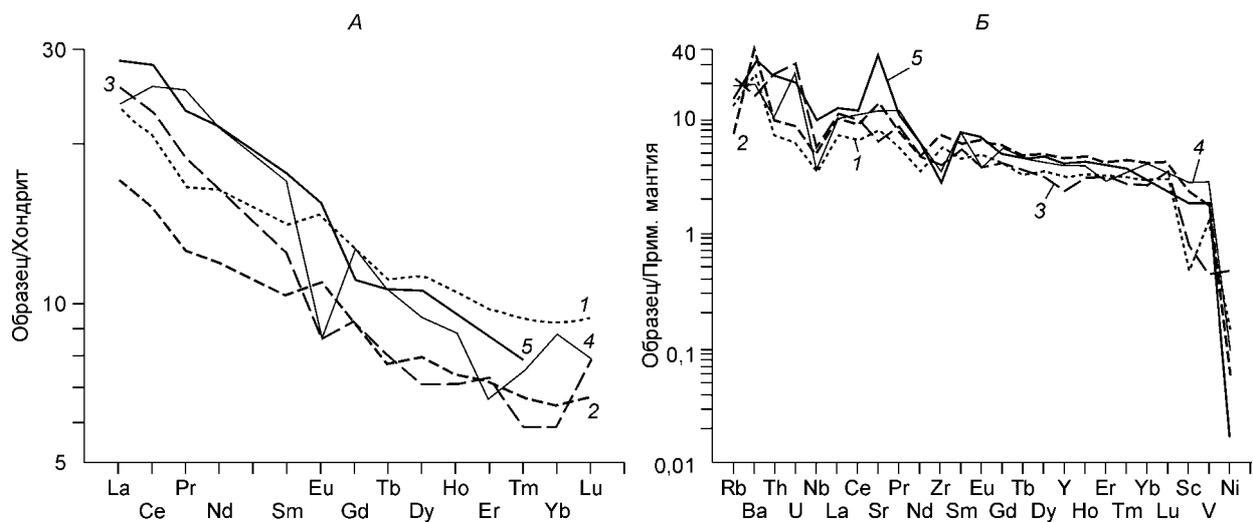


Рис. 4. Характер распределения редкоземельных и редких элементов в породах Кувалорогского массива.

Нормированных по хондриту (А) и примитивной мантии (В) в сравнении с сибирскими траппами (1, 2); 3—5 — нормированные концентрации в кортландитах, пироксенитах и норитах соответственно.

Таблица 2. Содержание главных и примесных элементов в минералах Кувалорогского массива

Компонент	Оливин		Амфибол		Флогопит	Ортопироксен		Плагиоклаз	Гранат
	KC1-II	KV-1	KV-1	P-1/1	KV-1	KV-1	P-265	P-265	P-123
SiO ₂ , мас, %	40,62	38,99	44,16	51,31	45,13	55,23	57,08	52,06	36,6
TiO ₂	—	—	1,46	0,78	1,26	—	—	—	0,37
Al ₂ O ₃	—	—	13,80	7,75	14,92	2,09	2,71	30,09	21,15
FeO	13,95	18,25	7,73	10,91	4,15	8,75	12,11	—	34,07
Cr ₂ O ₃	—	—	0,70	—	0,53	0,78	0,34	—	—
MnO	0,33	—	—	—	—	—	—	—	1,83
MgO	45,10	42,18	17,3	16,2	25,38	31,26	26,46	—	4,81
CaO	—	—	10,65	11,39	0,48	1,35	0,8	12,93	0,69
Na ₂ O	—	—	3,26	0,78	3,26	—	—	4,53	—
K ₂ O	—	—	0,39	0,28	4,75	—	—	—	—
Cl	—	—	—	—	0,14	—	—	—	—
Сумма	100	99,42	99,45	99,4	100	99,46	99,5	99,6	99,52
Элемент, г/т									
Cr	599	410	7480	709	6390	3597	2172	73	178
Ni	928	1008	1320	1163	1656	420	929	34	93
Sr	4,5	20	245	31	576	2,7	68	681	0,16
Zr	2,3	0,2	92	56	6	3,1	46	0,4	55
Ba	1,3	1,24	162	330	3717	1,2	36	265	0,2
La	0,17	0,79	5,8	14,64	2,76	0,02	3,76	2,07	0,01
Ce	0,34	0,03	22,6	54,57	0,16	0,05	13,05	3,53	0,11
Nd	0,21	0,03	23,3	62,73	0,01	0,11	9,86	1,01	2,13
Sm	0,09	0,06	7,35	20,15	0,11	0,07	2,67	0,18	5,7
Eu	0,04	0,002	2,25	1,04	1,05	0,03	0,59	1,07	0,41
Gd	0,07	—	7,96	23,26	—	0,08	3,45	0,2	12,73
Dy	0,05	0,03	7,1	29,38	0,38	0,31	3,45	0,08	28,6
Er	0,02	0,18	4,23	18,1	0,03	0,29	2,39	0,2	7,62
Yb	0,08	0,02	3,81	16,01	2,35	0,5	2,47	0,003	6,25
Th	0,07	0,004	0,10	0,33	0,02	0,01	0,13	0,01	0,002
U	0,01	0,01	0,05	0,14	0,04	0,01	0,04	0,01	0,003
Hf	0,04	0,07	3,6	8,57	1,03	0,17	1,82	0,04	8,03
Nb	0,07	0,01	6,6	8,93	8,42	0,03	2,58	0,005	0,08
Y	0,35	0,12	38,15	161,2	0,79	2,46	21,83	0,35	135
Легучие, %									
H ₂ O	—	—	2,59	3,02	4,91	—	—	—	—
F	—	—	0,07	0,07	0,10	—	—	—	—

Примечание. KC1-II, KV-1 — минералы кортландитов; P-265 — то же, роговообманковых пироксенов; P-1/1 — то же, роговообманковых норитов; P-123 — то же, гибридных диоритов; прочерк — содержание ниже предела обнаружения метода.

Из мультикомпонентных диаграмм (рис. 6) следует, что большинство крупноионных и высокозарядных элементов распределено в минералах ультрамафитов и мафитов примерно пропорционально их концентрации в хондритах, кроме Ni и Cr. Все породообразующие минералы Кувалорогского массива резко обеднены этими элементами так же, как и валовой состав пород этого комплекса. Это, на наш взгляд, служит дополнительным подтверждением истощенности родоначальной магмы данного массива никелем за счет его экстракции в сульфидную несмесимую жидкость, в большом количестве отделившуюся на доликвидусной стадии становления Кувалорогской интрузии. Отсюда следует вывод, что рассматриваемый массив можно считать перспективным на обнаружение в нем промышленного типа сульфидной минерализации. Минимум по Cr, вероятно, тоже объясняется его ранним концентрированием в хромшпинелидах, включениями которых изобилуют ранние оливины кортландитов.

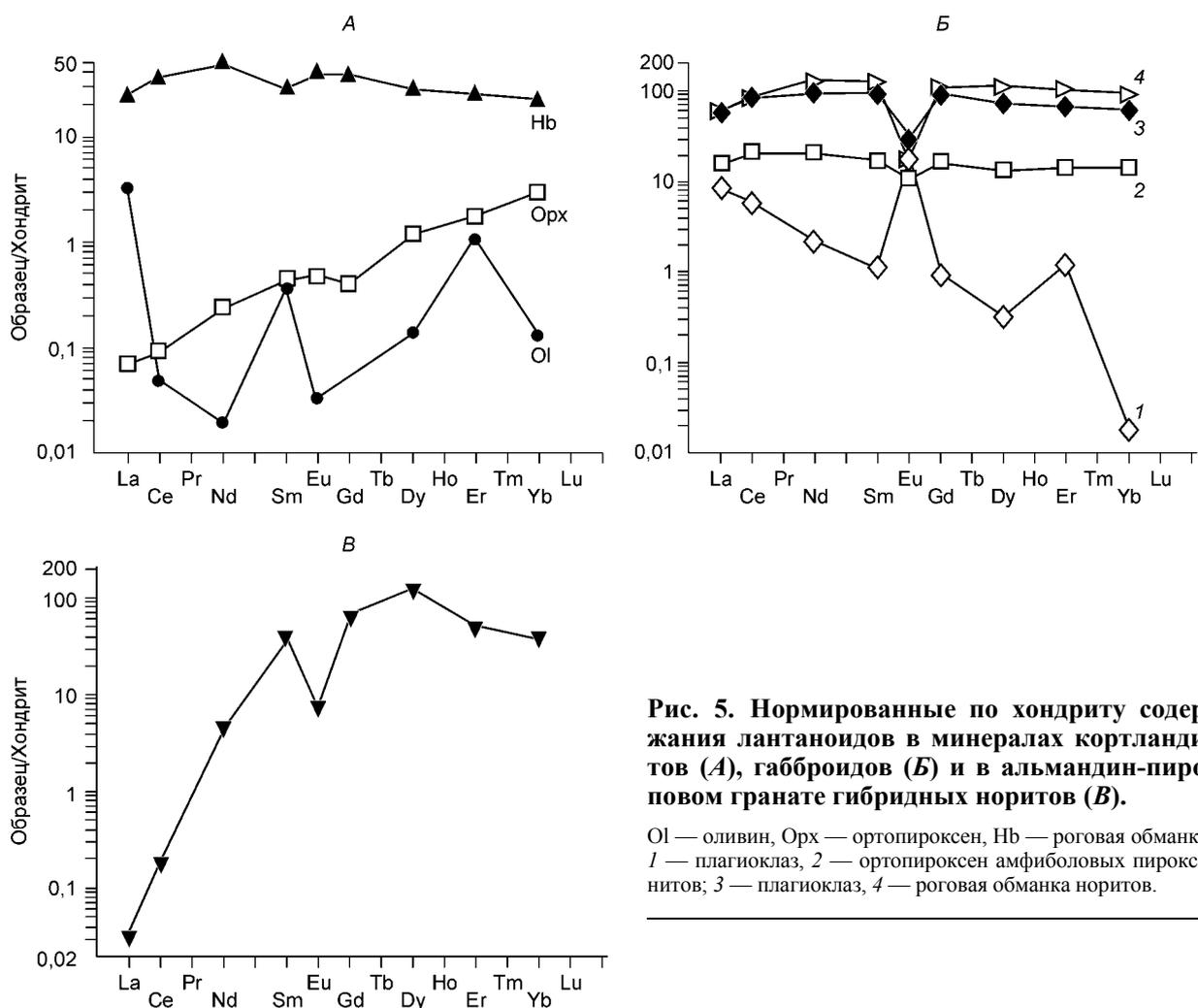


Рис. 5. Нормированные по хондриту содержания лантаноидов в минералах кортландитов (А), габброидов (Б) и в альмандин-пировом гранате гибридных норитов (В).

Ol — оливин, Орх — ортопироксен, Нб — роговая обманка; 1 — плагиоклаз, 2 — ортопироксен амфиболовых пироксенитов; 3 — плагиоклаз, 4 — роговая обманка норитов.

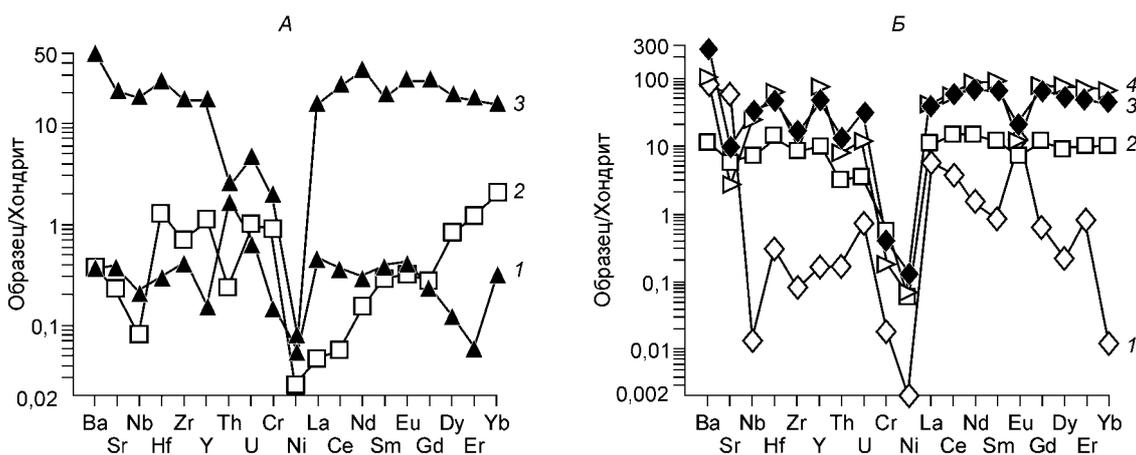


Рис. 6. Мультиэлементные диаграммы нормированных содержаний примесных элементов в кортландитах (А) и габброидах (Б).

А — 1 — оливин, 2 — ортопироксен, 3 — роговая обманка; Б — 1 — плагиоклаз и 2 — ортопироксен амфиболовых пироксенитов; 3 — плагиоклаз и 4 — роговая обманка норитов.

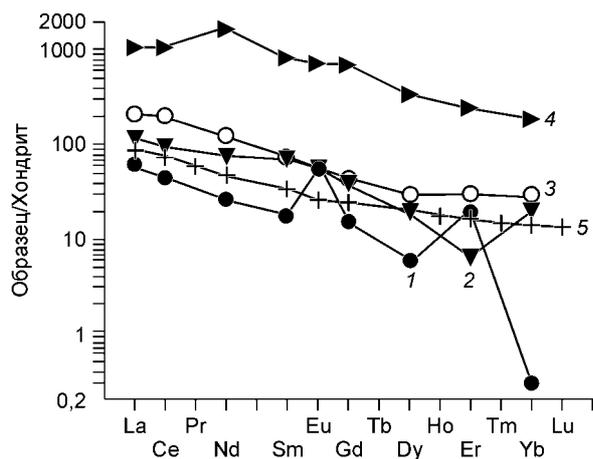


Рис. 7. Нормированные по хондриту содержания лантаноидов в исходном расплаве кортландитов.

Рассчитано исходя из коэффициентов разделения их в системе минерал—расплав и концентраций в плагиоклазе (1), оливине (2) и роговой обманке (3); 4 — то же, по ортопироксену пироксенитов; 5 — распределение тех же элементов в базальтах рифтогенной стадии сибирских траппов [Медведев, 2004].

Используя известные коэффициенты разделения РЗЭ между оливином, ортопироксеном, плагиоклазом, амфиболом и базальтовым расплавом [Леснов, 2000а,б, 2001а,б], мы попытались оценить содержание некоторых лантаноидов в исходном расплаве кортландитов Кувалорогского массива. Как видно из рис. 7, эти данные, рассчитанные по содержаниям

РЗЭ в оливине, роговой обманке и плагиоклазе, неплохо коррелируются между собой и со средними содержаниями этих элементов в базальтах сибирских траппов, изливавшихся на рифтогенном этапе их становления [Медведев, 2004]. В то же время нормированные содержания лантаноидов в исходном расплаве пироксенитов, которые были определены таким же путем, исходя из содержания редких земель в ортопироксене и $K_{\text{px-L}}^{\text{Opx-L}}$ [Леснов, 2001а], примерно на порядок величины выше, чем в расплаве, из которого формировались кортландиты. Таким образом, очевидно, что магма норитовой фазы Кувалорогской интрузии претерпела существенную дифференциацию по сравнению с родоначальной для кортландитов.

Итак, подводя итог вышеизложенному, можно сделать следующие выводы:

Данные по распределению главных, малых и редкоземельных элементов в породах Кувалорогского массива, типичного представителя габбро-кортландитовой интрузивной формации, недвусмысленно указывают на образование всех пород массива в процессе глубинной дифференциации единого расплава, сходного с вулканитами траппов Сибирской платформы, поступавшего в камеру массива из глубинного очага в результате трех интрузивных импульсов. Первый импульс привел к образованию кортландитов, второй — норитовой серии пород, третий — даек лампрофиров.

Особенности распределения РЗЭ в породообразующих минералах данного массива в ряде случаев обнаруживают сходство с таковыми в высокобарических мафит-ультрамафитовых комплексах, что хорошо согласуется с имеющимися оценками глубины становления Кувалорогского интрузива 20—26 км.

Обнаруженная высокая степень истощенности пород и породообразующих минералов рассматриваемого плутона Ni предполагает, что на раннем этапе становления Кувалорогской интрузии от нее отделилось большое количество сульфидного расплава, несмешанного с базитовой магмой. Это позволяет надеяться на высокую вероятность обнаружения в ней богатых сульфидных руд жильного типа.

Явное сходство Кувалорогской интрузии по геохимическим особенностям с магматическими породами трапповой формации служит подтверждением ее формирования в геодинамической обстановке континентального рифтогенеза и плюмовой тектоники.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 04-05-65323 и РФФИ-ГФЕН № 02-05-39012.

ЛИТЕРАТУРА

Байков А.И., Кутыев Ф.Ш., Сидоров Е.Г., Яроцкий Г.П. Медно-никелевое сульфидное оруденение Камчатки // Никеленосность базит-гипербазитовых комплексов Украины, Урала, Сибири и Дальнего Востока. Апатиты, ГИ КНЦ, 1988, с. 59—61.

Вржосек А.А. Габбро-кортландитовые комплексы Юго-Западного Приморья // Вопросы магматизма, метасоматизма и оруденения Дальнего Востока. Владивосток, ДВГИ АН СССР, 1973, с. 49—52.

Зимин С.С. Формация никеленосных роговообманковых базитов Дальнего Востока. Новосибирск, Наука, 1973, 90 с.

Игнатъев Е.К., Баженов Е.А., Козлов А.Н., Округин В.М., Чубаров В.М., Евстигнеева Т.Л., Минеев С.Д. Геология и медно-никелевое оруденение Срединного массива Камчатки // Никеленосность базит-гипербазитовых комплексов Украины, Урала, Сибири и Дальнего Востока. Апатиты, ГИ КНЦ, 1988, с. 61—63.

Конников Э.Г., Чубаров В.М., Травин В.А., Матуков Д.И., Сидоров Е.Г. Время проявления никеленосной норит-кортландитовой формации на востоке азиатского континента // Геохимия, 2006, № 5, с. 564—570.

Леснов Ф.П. Закономерности распределения редкоземельных элементов в оливинах // Зап. ВМО, 2000 а, ч. 129, № 6, с. 88—103.

Леснов Ф.П. Закономерности распределения редкоземельных элементов в амфиболах // Зап. ВМО, 2000 б, ч. 129, № 5, с. 75—96.

Леснов Ф.П. Закономерности распределения редкоземельных элементов в ортопироксенах // Зап. ВМО, 2001а, ч. 130, № 1, с. 3—20.

Леснов Ф.П. Геохимия редкоземельных элементов в плагиоклазах // Геология и геофизика, 2001б, т. 42 (6), с. 917—936.

Леснов Ф.П. Закономерности распределения редкоземельных элементов в гранатах // Зап. ВМО, 2002, ч. 131, № 1, с. 79—95.

Марковский Б.А. Крайне-океанический тип рифтогенного ультрамафит-мафитового магматизма Азиатско-Тихоокеанской транзитали // Геология и металлогения мафит-ультрамафитовых и гранитоидных интрузивных ассоциаций складчатых областей (Матер. междунар. научн. конф.). Екатеринбург, ИГГ УрО РАН, 2004, с. 44—48.

Медведев А.Я. Пермотриасовый вулканизм Северо-Азиатского кратона (Западно-Сибирская плита и Тунгусская синеклиза): геохимия, петрология и геодинамика: Автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. Иркутск, 2004, 32 с.

Полетаев В.А. Камчатская платиноидно-никелевая зона: геология и рудоносность: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М., 2004, 23 с.

Скублов С.Г., Другова Г.М. Редкоземельные элементы в зональных метаморфических минералах // Геохимия, 2004, № 3, с. 288—301.

Щека С.А. Окологабброидные роговики и гранулитовые породы Камчатки // Петрология и петрохимия магматических и метаморфических пород Дальнего Востока. Владивосток, ДВГИ АН СССР, 1975, с. 167—196.

Щека С.А., Чубаров В.М. Никеленосные кортландиты Камчатки // Изв. АН СССР, Сер. геол., 1987, № 12, с. 35—42.

Barclay J., Carmichael I.S.E. A hornblende basalt from Western Mexico: water-saturated phase relations constrain a pressure-temperature window of eruptibility // J. Petrol., 2004, v. 45, № 3, p. 485—506.

Lightfoot P.C., Hawkesworth C.J., Hergt J., Naldrett A.J., Gorbachev N.S., Fedorenko V.A., Doherty W. Remobilisation of the continental lithosphere by mantle plume: major-, trace-element, and Sr-, Nd-, and Pb-isotope evidence from picritic and tholeiitic lavas of the Noril'sk District, Siberian trap, Russia // Contr. Miner. Petrol., 1993, v. 114, p. 171—188.

Vannicci R., Shimizu N., Piccardo G.B., Bottazzi P. Distribution of trace elements during breakdown of mantle garnet: an example from Zagargad // Contr. Miner. Petrol., 1993, v. 34, № 1, p. 437—449.

*Поступила в редакцию
18 июля 2005 г.*