

УДК 550.461 : 550.89

ИЗОТОПНЫЕ И ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ВАРИАЦИИ В ЛАВАХ ВУЛКАНОВ СЕВЕРНОЙ ГРУППЫ (КАМЧАТКА) В СВЯЗИ С ОСОБЕННОСТЯМИ ПРОЦЕССА СУБДУКЦИИ

© 2000 г. О. Н. Волынец*, А. Д. Бабанский**, Ю. В. Гольцман**

* Институт вулканической геологии и геохимии ДВО РАН
683006 Петропавловск-Камчатский, бульв. Пуйна, 9
e-mail: ivvg@svyaz.kamchatka.su

** Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН
109017 Москва, Старомонетный пер., 35
e-mail: babansky@igem.msk.su

Поступила в редакцию после доработки 01.10.98 г.

При сравнительном изучении геохимического и изотопного состава лав вулканов Северной группы (Камчатка) установлены две ассоциации вулканов: одна включает вулканы, расположенные севернее реки Камчатка - Шивелуч, Заречный, Харчинский, и Харчинскую региональную зону шлаковых конусов, другая - вулканы, находящиеся южнее реки Камчатка - Ключевской, Плоские сопки, Толбачик, Николка и др., а также Толбачинскую и Плоских сопков зоны шлаковых конусов. Вулканические породы первой ассоциации отличаются от эффузивов второй высокой магнезиальностью (в целом) и повышенным содержанием Sr, пониженными концентрациями Ca, Sc, Y, Yb, а также высокими величинами Sr/Y, K/Ti, La/Yb, Zr/Y, Th/Yb, Ni/Sc, Cr/Sc и низкими - Ca/Sr и U/Th отношений. Вариации изотопных отношений Sr и Nd в породах обеих ассоциаций вулканов перекрываются. При этом ковариации изотопных характеристик как между собой, так и с некоторыми главными и редкими элементами для пород выделенных ассоциаций вулканов различны. На основании полученных данных сделан вывод о том, что исходные расплавы для пород каждой из выделенных ассоциаций вулканов формировались при метасоматическом преобразовании материала мантийного клина различными агентами: для северных вулканов это были частичные расплавы из субдуцируемой плиты, а для южнее расположенных вулканов таким агентом служил флюид из субдуцируемой плиты. Одну из причин этого авторы видят в различных условиях субдукции, когда под северными вулканами субдукция косая, пологая и медленная (подобная, например, субдукции в Западных Алеутах), а под вулканами южной ассоциации имеет место ортогональная субдукция древней океанической коры.

В последнее время появилось несколько важных публикаций по геохимии и изотопному составу лав вулканов Северной группы на Камчатке [1-9], дополняющих более ранние работы российских исследователей, посвященные этому вопросу [10-15]. Однако большая часть этих работ касается вулканов, расположенных южнее долины реки Камчатка (ЮВСГ - южные вулканы Северной группы) и только в незначительном числе работ были опубликованы данные по породам вулканов Шивелуч, Харчинский, Заречный и Харчинской региональной зоны шлаковых конусов - т.е. по вулканическим образованиям северной части этой группы (СВСГ - северные вулканы Северной группы). Наше даже предварительное изучение состава пород трех последних вулканов показало их заметное отличие от пород, слагающих южнее расположенные вулканы.

Во-первых, было установлено, что среди эффузивов СВСГ преобладают породы магнезиаль-

ного типа, а на вулканах Шивелуч и Заречный были обнаружены не только магнезиальные базальты, но и магнезиальные андезиты [13, 14, 16, 17]. Далее, объем магнезиальных базальтов здесь в 5-10 раз больше, чем на всех других вулканах Камчатки вместе взятых, включая и южные вулканы рассматриваемой группы [18]. Во-вторых, было обнаружено, что магнезиальные базальты СВСГ отличаются от своих южных аналогов повышенным содержанием K, Ba, Sr и пониженным Ca, Sc, Yb и обладают более высокими величинами отношений La/Yb, La/Ta и Ni/Sc. Они также содержат больше воды и кристаллизовались при повышенной летучести кислорода [16]. В-третьих, было найдено, что магнезиальные андезиты вулканов Шивелуч и Заречный характеризуются меньшей величиной отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ по сравнению с подобными породами вулкана Плоский, который находится южнее р. Камчатка [19]. Все это позволяет предполагать различный состав источника магматических расплавов для вул-

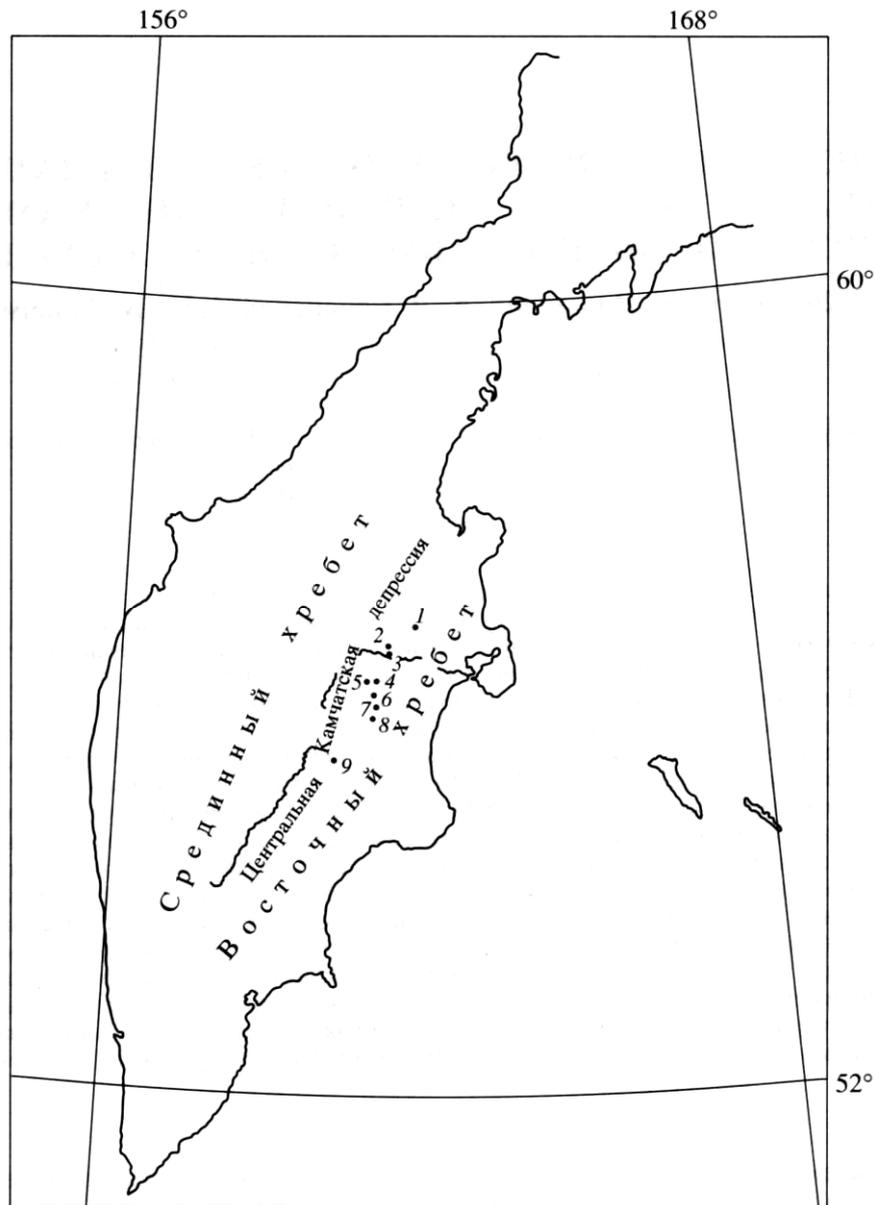


Рис. 1. Расположение вулканов Северной группы (упрощенная схема из [21]). Вулканы: 1 - Шивелуч, 2 - Харчинский, 3 - Заречный, 4 - Ключевской, 5 - Ушковский (Плоский), 6 - Безымянный, 7 - Толбачик, 8 - Большая Удина, 9 - Николка.

канов, расположенных севернее и южнее р. Камчатка [16, 20].

Цель настоящего сообщения продолжить сравнительное изучение редкоэлементного и изотопного состава лав вулканов Северной группы для лучшего понимания причин возникновения установленных различий. Для этого мы используем только собственные данные для пород СВСГ (табл. 1), а для пород ЮВСГ (табл. 2) приводим, в основном, опубликованные данные, особенно по изотопии.

ГЕОЛОГО-СТРУКТУРНОЕ ПОЛОЖЕНИЕ СЕВЕРНОЙ ГРУППЫ ВУЛКАНОВ

Северная группа вулканов занимает наиболее широкую часть Центральной Камчатской депрессии (ЦКД) - грабена, разделяющего Восточный и Срединный хребты (рис. 1). Эта структура растяжения протягивается параллельно глубоководному желобу и прослеживается от пролива Литке на севере до Гольгинского прогиба на юге Камчатки и далее в виде Курильского задугового бассейна на территории Курил. Формирование ЦКД началось в раннем плиоцене и некоторые

Таблица 1. Представительные составы пород северных вулканов Северной группы (оксиды главных элементов - в мас. %, редкие элементы - в г/т)

Компонент	1	2	3	4	5	6	7
SiO ₂	51.18	50.06	51.46	54.22	55.84	56.84	57.50
TiO ₂	0.72	0.67	0.77	0.8	0.82	0.56	0.52
Al ₂ O ₃	13.67	12.27	13.77	15.66	15.72	16.66	16.57
Fe ₂ O ₃	3.2	3.12	2.69	2.55	3.76	3.07	2.59
FeO	5.55	5.52	5.69	5.17	3.48	3.16	3.59
MnO	0.18	0.13	0.15	0.16	0.14	0.08	0.09
MgO	12.08	15.02	11.33	8.40	7.05	5.93	5.54
CaO	8.36	8.16	6.32	9.02	7.17	7.30	7.24
Na ₂ O	2.55	2.31	2.38	3.05	3.99	3.87	4.17
K ₂ O	1.67	1.68	1.16	1.28	1.33	1.43	1.48
P ₂ O ₅	0.37	0.56	0.12	0.27	0.33	0.23	0.23
ППП	0.80	0.64	4.08	0.07	0.56	0.68	0.18
Сумма	100.33	100.14	99.92	100.65	100.19	99.81	99.70
Mg#	0.719	0.763	0.713	0.667	0.647	0.641	0.625
Cr	790	884	722	483	438	208	307
Ni	234	230	-	114	84	50	72
Co	47	47	46	34	31	31	26
Sc	39	33	24	29	26	24	19
V	112	248	-	29	26	-	-
Rb	32	41	-	-	22	17	24
Cs	-	1.0	1.3	0.6	0.7	1.7	0.7
Ba	452	509	238	330	323	445	481
Sr	406	462	310	526	481	316	497
Ta	0.13	0.08	0.15	0.11	0.15	0.14	0.16
Nb	2.2	2.3	-	1.0	-	3	-
Hf	-	2.57	2.27	-	2.61	3.40	2.82
Zr	73	86	-	-	-	97	-
Ti	4316	4017	4616	4796	4016	3357	3117
Y	19	20	-	16	-	17	-
Th	-	0.9	1.6	0.9	0.9	1.7	1.2
U	-	0.6	0.5	0.5	0.6	0.4	0.7
La	11.0	9.0	8.2	7.5	8.0	9.0	9.1
Ce	21.2	22.3	19.5	18.9	20.5	20.8	22.3
Nd	12	15	-	11	15	12	12
Sm	3.60	4.20	2.65	2.99	3.42	3.07	2.98
Eu	1.10	1.23	0.76	0.86	0.99	1.04	0.84
Gd	-	-	-	-	-	-	-
Tb	0.87	0.60	0.40	0.41	0.56	0.51	0.42
Yb	2.1	1.7	1.3	1.6	2.0	1.4	1.4
Lu	0.28	0.25	0.19	0.23	0.29	0.26	0.21
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	0.703703	0.703805	0.703780	0.70347*	0.70353*	0.70338*	0.70341*
±2σ	14	18	15	7	3	3	7
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	0.513059	0.513039	0.512954	0.513089*	0.513098*	-	0.513112*
±2σ	10	8	8	8	10	-	6
εNd (±2σ)	8.21(20)	7.82(16)	6.16(16)	8.80(16)	8.97(20)	-	9.25(12)
Sr/Y	21.4	23.1	-	32.9	-	18.6	-
Ti/Sr	10.6	8.7	14.9	9.1	10.2	10.6	6.3
La/Yb	5.2	5.3	6.3	4.6	4.0	-	6.6

Таблица 1. Продолжение

Компонент	8	9	10	11	12	13	14
SiO ₂	51.76	41.99	43.00	52.54	51.64	52.30	57.49
TiO ₂	0.98	–	–	0.86	0.90	0.87	0.69
Al ₂ O ₃	16.6	1.65	0.56	12.37	12.36	12.53	14.40
Fe ₂ O ₃	4.43	4.32	1.55	3.08	4.32	3.45	2.55
FeO	4.28	6.28	5.08	5.7	4.9	5.44	5.04
MnO	0.09	0.15	0.13	0.16	0.16	0.16	0.15
MgO	6.74	45.30	48.26	11.48	11.20	11.88	6.88
CaO	8.4	0.43	0.10	8.50	8.74	8.62	6.92
Na ₂ O	3.43	0.10	0.16	2.84	2.76	2.69	3.35
K ₂ O	1.16	0.22	0.06	1.42	1.42	1.35	1.70
P ₂ O ₅	0.21	–	–	0.24	0.23	0.23	0.25
ППП	1.75	0.20	0.38	0.40	0.57	0.43	0.45
Сумма	99.83	100.64	99.28	99.59	99.20	99.95	99.87
Mg#	0.592	0.888	0.930	0.707	0.694	0.712	0.626
Cr	–	–	2600	906	1068	1029	518
Ni	–	–	2100	186	213	209	85
Co	–	–	140	46	40	47	32
Sc	–	–	3	30	30	29	26
V	–	–	40	–	–	–	–
Rb	–	–	1	14	–	–	19
Cs	–	–	H.o.	0.53	0.56	0.42	0.58
Ba	–	–	H.o.	756	816	726	462
Sr	–	–	21	710	707	696	527
Ta	–	–	0	0.09	0.08	0.14	0.11
Nb	–	–	3	3	–	–	2
Hf	–	–	–	2.03	2.11	2.00	2.29
Zr	–	–	17	79	–	–	83
Ti	5875	–	H.o.	5156	5396	5216	4137
Y	–	–	11	18	–	–	18
Th	–	–	H.o.	0.86	0.84	0.91	0.83
U	–	–	H.o.	0.59	0.52	0.61	0.62
La	–	–	0.5	9.5	9.8	9.1	8.1
Ce	–	–	35	25.7	24.3	24.4	20.4
Nd	–	–	–	16	16	15	14
Sm	–	–	0.03	3.97	4.10	3.86	3.34
Eu	–	–	–	1.09	1.14	1.09	0.83
Gd	–	–	–	–	–	–	–
Tb	–	–	–	0.52	0.52	0.45	0.45
Yb	–	–	–	1.5	1.5	1.5	1.3
Lu	–	–	–	0.22	0.22	0.23	0.19
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	0.703406	0.703720	0.704847	0.70349*	0.70333*	0.70339*	0.70347*
±2δ	14	20	27	6	7	5	7
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	0.513125	–	–	0.513083*	–	–	0.513069*
±2δ	10	–	–	10	–	–	9
εNd (±2δ)	9.50(20)	–	–	8.68(20)	–	–	8.41(18)
Sr/Y	–	–	1.9	39.4	–	–	29.3
Ti/Sr	–	–	–	7.3	7.6	7.5	7.9
La/Yb	–	–	–	6.2	6.5	6.2	6.1

Таблица 1. Окончание

Компонент	15	16	17	18	19	20	21
SiO ₂	59.00	59.81	50.78	49.52	53.14	50.76	52.60
TiO ₂	0.86	0.61	0.86	0.89	0.73	0.67	0.83
Al ₂ O ₃	15.20	16.04	13.89	13.96	14.05	10.61	13.78
Fe ₂ O ₃	3.80	6.07	4.92	4.00	4.74	1.97	3.30
FeO	1.89	–	4.18	5.20	2.42	6.39	6.54
MnO	0.11	0.12	0.17	0.18	0.12	0.23	0.14
MgO	5.07	4.58	11.03	12.05	8.38	18.68	9.52
CaO	6.74	6.24	8.86	9.26	7.75	6.50	8.90
Na ₂ O	4.05	4.55	2.87	2.85	3.55	2.13	2.44
K ₂ O	1.65	1.52	1.09	1.04	2.71	0.92	1.30
P ₂ O ₅	–	0.16	0.19	0.20	0.41	0.24	0.22
H ₂ O	1.24	0.58	0.66	0.40	1.21	1.00	0.16
Сумма	99.61	100.28	99.50	99.55	99.21	100.10	99.73
Mg#	0.630	0.599	0.696	0.709	0.691	0.803	0.641
Cr	198	442	636	826	393	1878	647
Ni	46	44	190	235	191	–	109
Co	20	20	44	48	35	60	46
Sc	–	16	37	36	24	24	38
V	175	150	250	225	208	–	–
Rb	22	21	10	11	33	15	–
Cs	–	0.59	0.40	0.12	0.46	0.41	0.38
Ba	771	950	375	362	1320	353	381
Sr	610	663	472	488	1100	223	429
Ta	–	0.15	0.07	0.07	0.14	0.09	0.03
Nb	3	2	–	–	2	2	–
Hf	–	2.47	1.70	2.10	3.34	1.64	1.87
Zr	98	100	–	112	144	73	–
Ti	5156	5096	4496	5336	4376	4017	4976
Y	18	17	–	17	7	17	–
Th	–	1.03	0.65	0.41	4.35	0.46	0.60
U	–	0.71	0.40	0.37	2.12	0.50	0.42
La	–	8.1	5.2	6.2	23.9	5.0	5.8
Ce	–	20.3	11.6	14.8	52.6	12.7	16.2
Nd	–	9	9	10	25	–	12
Sm	–	2.41	2.44	2.74	6.79	2.34	3.36
Eu	–	0.76	0.79	0.90	2.03	0.73	0.99
Gd	–	–	2.6	2.8	–	–	–
Tb	–	0.34	0.51	0.52	0.83	0.37	0.63
Yb	–	1.3	1.6	1.6	1.5	1.1	2.0
Lu	–	0.19	0.20	0.21	0.21	0.18	0.28
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	0.70354*	0.70345*	0.703552	0.703543	0.703652	0.703590	0.703680
+2δ	5	5	17	15	14	14	18
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	0.513098*	–	0.513099	0.513079	0.513113	0.513091	0.513084
±2δ	7	–	12	13	10	8	14
εNd (±2δ)	–	–	8.99(18)	8.60(25)	9.25(10)	8.84(16)	8.70(27)
Sr/Y	33.9	39.0	–	28.7	64.7	13.1	–
Ti/Sr	8.5	7.7	9.5	10.9	4.0	18.0	11.6
La/Yb	–	6.5	3.3	3.9	16.1	4.5	2.9

Примечание. 1-10 - в. Шивелуч: 1 (обр. 5734) - *Ol-Amph-Cpx* магнезиальный высококалийный базальт; 2 (обр. 1188/1) - *Ol-Amph-Cpx-Phl* магнезиальный высококалийный базальт; 3 (обр. 90099в/7) - *Ol-Cpx Amph*-содержащий умереннокалийный базальт; 4 (обр. 5764С) - *Ol-Cpx* магнезиальный умереннокалийный андезитобазальт; 5 (обр. 5749/1С) - *Ol-Cpx-Amph* - магнезиальный умереннокалийный андезитобазальт; 6 (обр. 5738) - *Amph-Pl* магнезиальный умереннокалийный андезит; 7 (обр. 5740) - то же; 8 (обр. 5746) - *Ol-Px-Pl* глиноземистый умереннокалийный базальт; 9 (обр. 5702/49) - гарцбургит, ксенолит в андезитовой пемзе; 10 (обр. 5702) - дунит, ксенолит в андезитовой пемзе. 11-16 - в. Заречный: 11 (обр. 1002/1 С) - *Ol-Cpx* магнезиальный умереннокалийный базальт; 12 (обр. 1002/2С) - то же; 13 (обр. 1002/4С) - то же; 14 (обр. 1004С) - *Ol-Cpx* магнезиальный умереннокалийный андезит; 15 (обр. 7700) - *Amph-Pl* магнезиальный умереннокалийный андезит; 16 (обр. 7701) - то же. 17-19 - в. Харчинский: 17 (обр. 5601GG) - *Ol-Cpx* магнезиальный умереннокалийный базальт; 18 (обр. 5606GG) - то же; 19 (обр. 5612/АКор) - *Ol-Cpx-Amph-Phl* абсарокит. 20-21 - Харчинская зона ареального вулканизма: 20 (обр. 1023) - *Ol* магнезиальный умереннокалийный базальт; 21 (обр. 1006С) - *Ol-Cpx* магнезиальный умереннокалийный базальт.

Здесь и в таблице 2 анализы редкоземельных элементов, Та, Th, U, Hf, Cs, отчасти Ва, Sr, Cr, Ni, Co, Sc выполнены инструментальным нейтронно-активационным методом в Корнелльском университете, США, Институте горного дела и технологии, США, ОИГГМ СО РАН. Часть определений Ва, Sr, Cr, Ni, Co, Sc, а также определений Zr, Y, V, Nb - рентгено-флуоресцентным методом в ОИГГМ СО РАН и Копенгагенском университете. Валовые химические анализы пород выполнены в основном в Институте вулканологии ДВО РАН. Измерения изотопного состава выполнены на приборах Сектор-54 и МИ-1320 (последние отмечены звездочкой *) в ИГЕМ РАН. Проверк в графе - элемент не определялся.

Таблица 2. Представительные составы базальтов некоторых южных вулканов Северной группы (оксиды главных элементов - в мас. %, редкие элементы - в г/г)

Компонент	1	2	3	4	5	6	7	8
SiO ₂	49.76	50.22	51.45	50.22	52.96	51.96	52.16	50.30
TiO ₂	0.89	1.55	0.95	0.92	0.95	1.12	1.15	0.76
Al ₂ O ₃	14.91	17.00	13.65	14.13	14.61	18.28	17.01	13.70
Fe ₂ O ₃	1.76		2.46				2.90	2.80
FeO	7.52	10.49	6.76	9.33	8.92	9.60	6.78	6.29
MnO	0.19	0.20	0.17	0.18	0.20	0.15	0.20	0.14
MgO	9.74	5.22	9.70	10.12	9.27	4.44	5.92	11.78
CaO	11.62	9.24	11.68	10.93	9.26	9.04	8.95	10.74
Na ₂ O	2.03	3.49	2.40	2.38	2.93	4.00	3.16	2.30
K ₂ O	0.81	2.16	0.88	0.88	0.75	1.20	1.20	0.87
P ₂ O ₅	0.23	0.47	0.21	0.28	0.15	0.24	0.25	0.21
ППП	0.26	—	0.30	—	—	—	0.18	0.12
Сумма	99.72	100.04	100.61	99.37	100.00	100.03	99.86	100.01
Mg#	0.656	0.470	0.658	0.659	0.649	0.452	0.529	0.704
Cr	626	123	376	651	520	35	56	846
Ni	113	64	92	137	113	26	30	202
Co	32	35	39	43	43	35	32	48
Sc	46	26	40	43	37	32	33	38
V	—	—	295	—	—	—	250	260
Rb	18	50	17	—	—	15	15	9
Cs	0.54	4.97	—	0.54	0.45	0.54	0.50	—
Ba	221	509	248	246	258	476	442	233
Sr	319	305	284	318	320	412	345	239
Ta	0.14	0.43	—	0.13	0.13	0.16	0.13	—
Nb	—	2.0	2.8	—	—	2.6	—	1.9
Hf	2.13	5.23	—	2.07	2.04	2.86	2.60	—
Zr	80	200	77	—	—	98	—	63
Ti	5336	9292	5695	5515	5695	6714	6894	4556
Y	20	33	20	—	—	25	—	19
Th	0.56	2.08	0.48	0.56	0.48	0.79	0.51	—
U	0.37	1.28	0.43	0.50	0.40	0.56	0.44	—
La	7.00	18.48	6.10	6.91	5.08	7.90	6.50	5.00
Ce	19.20	45.30	13.00	18.20	13.80	21.00	16.20	13.00
Nd	12.90	28.60	9.70	12.20	13.60	13.70	11.20	8.00
Sm	3.68	7.34	2.83	3.47	2.89	4.10	3.38	—
Eu	1.08	1.85	0.92	0.98	0.91	1.29	1.06	—
Gd	—	—	3.2	—	—	—	4.30	—
Tb	0.66	1.11	0.55	0.63	0.56	0.76	0.71	—
Yb	2.13	3.63	1.92	2.03	1.99	2.91	2.76	—
Lu	0.30	0.53	0.27	0.29	0.30	0.43	0.40	—
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	—	—	0.703352	—	0.703559	—	—	—
±2δ	—	—	15	—	20	—	—	—
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	—	—	0.513074	—	0.513099	—	—	—
±2δ	—	—	9	—	8	—	—	—
εNd (±2δ)	—	—	8.52(18)	—	8.99(16)	—	—	—
Sr/Y	16.0	9.2	14.2	—	—	16.7	—	12.6
Ti/Sr	16.7	30.5	20.1	17.3	17.8	16.3	20.0	19.1
La/Yb	3.3	5.1	3.2	3.4	2.6	2.7	2.4	—

Примечание. 1-4 Толбачинский Дол: 1-3 - Большое трещинное Толбачинское извержение 1975-76 гг.: 1 (обр. 6011)-*Ol-Cpx* магнезиальный умереннокалиевый базальт, Северный прорыв; 2 (обр. 6100С) - *Ol-Cpx-Pl* глиноземистый субщелочной базальт, Южный прорыв; 3 (обр. 6024Кo) - *Ol-Cpx* магнезиальный умереннокалиевый базальт, Северный прорыв; 4 (обр. F857C) - *Ol-Cpx* магнезиальный умереннокалиевый базальт, Песчаные Горки. 5-8 в. Ключевской: 5 (обр. 85025C) - *Ol-Cpx-Pl* магнезиальный умереннокалиевый базальт, побочный прорыв; 6 (обр. 7400С) - *Ol-Cpx-Pl* глиноземистый умереннокалиевый базальт, исторический побочный прорыв; 7 (обр. 808GG) - *Ol-Cpx-Pl* глиноземистый умереннокалиевый базальт, исторический побочный прорыв; 8 (обр. ВРККo) - *Ol-Cpx* магнезиальный умереннокалиевый базальт. В образцах 2,4-6 все железо в виде FeO.

исследователи рассматривают ее как континентальный задуговый рифт [22]. Северная часть территории рассматриваемой вулканической группы располагается в зоне сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг, где зона субширотных дислокаций сдвигового типа, продолжающих Алеутский желоб, протягивается на запад вплоть до города Ключи [23]. Эта зона дислокаций вместе с Алеутским желобом и другими магистральными структурами западного окончания Алеутской дуги (разломы Беринга, Стеллера, Альфа и продолжающие их на территории Камчатки субширотные тектонические зоны) разделяет, по мнению ряда исследователей [8, 23, 24], древнюю (~100 млн. лет) океаническую литосферу на юге и молодую (примерно 15 млн. лет), сформировавшуюся во время открытия Командорского бассейна, океаническую литосферу на севере. Добавим, что по сейсмологическим данным [25], верхняя кромка зоны субдукции расположена под Ключевским вулканом на глубине примерно 160 км, а под вулканом Шивелуч - не более 100 км.

Группа включает 5 активных (в.в. Ключевской, Шивелуч, Безымянный, Плоский Толбачик и Ушковский), более 10 погасших вулканов и 3 региональных зоны шлаковых конусов (Харчинская, Плоских Сопок и Толбачинская с современной активностью в последней). В основании ЮВСГ лежат плиоцен-раннеплейстоценовые лавовые плато, тогда как СВСГ расположены на неогеновом осадочном фундаменте. Продуктивность вулканов Северной группы в позднем плейстоцене-голоцене составляет примерно 3500 км³ (за последние 50000 лет), что гораздо больше продуктивности других действующих вулканов Камчатки [26]. К тому же два наиболее продуктивных современных вулкана - базальтовый Ключевской и андезитовый Шивелуч входят как раз в Северную группу. В целом СВГ расположена в районе устойчивого погружения. Под вулканом Ключевской эта тенденция фиксируется даже на уровне границы Мохоровичича [26]. По последним данным погружение имеет компенсационный характер и связано с интенсивной вулканической деятельностью.

ПЕТРОХИМИЯ И СОСТАВ МИНЕРАЛОВ

По химическому составу вулканические породы варьируют в целом от базальтов до андезитов (табл. 1, 2). Дацинты редки и найдены только на некоторых вулканах (напр. в. Большая Удина). На этом фоне отчетливо выделяются базальт-андезитобазальтовые вулканы (Ключевской, Толбачик, Толбачинская региональная зона шлаковых конусов) и андезитобазальт-андезитовые (Шивелуч, Безымянный, региональная зона шлаковых конусов Плоских Сопок). Преобладающая часть пород относится к умереннокалиевой се-

рии, но иногда (в.в. Николка, Плоские Сопки, Толбачинская региональная зона шлаковых конусов) встречаются и высококалиевые разновидности. Больше того, по содержанию К₂O некоторые породы на вулканах Николка и Харчинский соответствуют типичным породам абсарокит-шошонит-латитовой серии. Среди основных пород преобладают высокоглиноземистые базальты, хотя в ряде мест - Толбачинская региональная зона шлаковых конусов (среди продуктов эруптивной деятельности последних 2000 лет [27]), в лавах побочных извержений на вулкане Ключевской, на вулкане Плоский (один лавовый поток), в голоценовой тефре на вулкане Шивелуч [20], встречаются и магнезиальные разновидности. В то же время этот тип пород является преобладающим на вулканах Заречный и Харчинский и в Харчинской региональной зоне шлаковых конусов.

Лавы СВСГ принадлежат к известково-щелочной серии, в отличие от лав ЮВСГ, где несмотря на наличие известково-щелочных разновидностей (базальты и андезитобазальты вулкана Ключевской, магнезиальные базальты Толбачинского дола, многие андезитобазальты и андезиты вулкана Безымянный) широко распространены и толеитовые (высококалиевые базальты Толбачинского дола, высококалиевые лавы вулкана Плоские сопки, вулкана Николка и др.). В целом известково-щелочные характеристики в лавах СВСГ проявлены сильнее, чем в породах ЮВСГ (рис. 2). Особенно это касается андезитобазальтов и андезитов. Кроме того, по высокому коэффициенту магнезиальности андезиты вулканов Шивелуч и Заречный могут быть отнесены к магнезиальным андезитам. Добавим, что высокоглиноземистые высококалиевые базальты Толбачинской региональной зоны шлаковых конусов и вулканов Николка и Плоские сопки характеризуются, по сравнению с умереннокалиевыми глиноземистыми и магнезиальными базальтами этих же и других вулканов Северной группы, высоким содержанием титана.

Вкрапленники в базальтах ЮВСГ представлены *Ol*, *Cpx*, *Sp*, *Pl*. В породах среднего состава к ним присоединяются *Orx* и, редко, *Amph* (в андезитах и дацитах вулканов Безымянный и Удина), а вместо шпинели кристаллизуется титаномагнетит. В лавах СВСГ амфибол значительно более распространен и является одним из главных минералов порфириновых выделений. Он встречается здесь не только в магнезиальных андезитах совместно с плагиоклазом, Ti-магнетитом, небольшим количеством *Orx*, *Cpx* и даже *Ol*, но и в магнезиальных андезитобазальтах (в той же минеральной ассоциации) и магнезиальных базальтах (вместе с *Ol*, *Sp*, *Cpx* и *Amph* в умереннокалиевых разновидностях, к которым добавляется флогопит в высококалиевых базальтах и абсарокитах). Вариации относительного количества амфибола

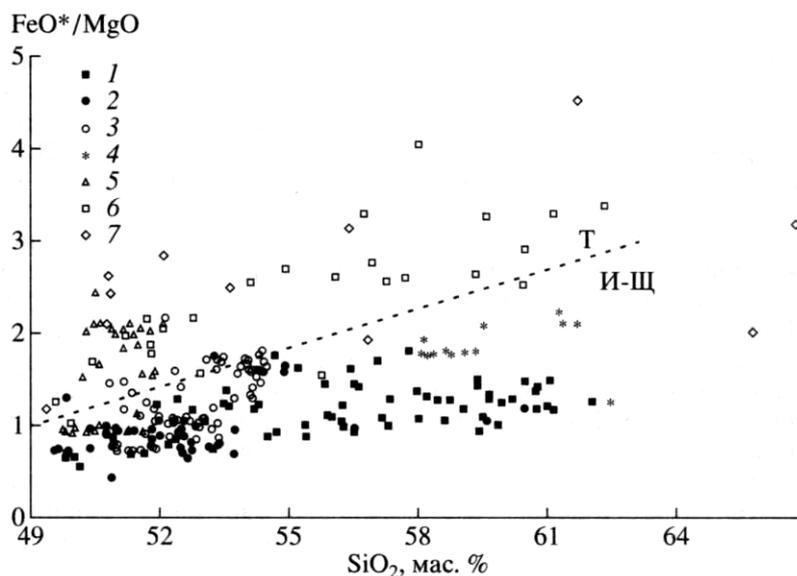


Рис. 2. Соотношение величины отношения FeO^*/MgO (здесь FeO^* означает $\text{FeO}_{\text{общее}}$) с содержанием SiO_2 в породах: 1 - в. Шивелуч, 2 - в.в. Заречный и Харчинский, 3 - в. Ключевской, 4 - в. Безымянный, 5 - Большого трещинного Толбачинского извержения 1975-76 гг. и Толбачинского Дола, 6 - в. Плоские сопки, 7 - в. Николка. Пунктирная линия разделяет толеитовую (Т) и известково-щелочную (И-Щ) серии пород [28].

в породах вызваны различным содержанием воды в расплавах и степенью их окисленности. Так, согласно результатам ильменит-магнетитовой геооксидометрии, породы толеитовой серии, не имеющие среди вкрапленников водосодержащих темноцветных минералов, формировались при летучести кислорода на 0.5-1.5 порядка выше равновесной f_{O_2} : для буфера никель-бунзенит, тогда как при образовании амфиболсодержащих известково-щелочных пород летучесть кислорода превышала равновесную для этого буфера на 2-2.5 порядка [29].

Состав одноименных минералов в породах СВСГ и ЮВСГ при сходстве по ряду компонентов может заметно отличаться по другим компонентам, содержание которых в материнских породах различно. Например, оливины во вкрапленниках магнезиальных базальтов СВСГ и ЮВСГ близки между собой по содержанию форстеритового минала, но различаются по содержанию CaO , пониженная концентрация которого в оливине из пород СВСГ отражает более низкую концентрацию этого компонента в их валовом составе [20]. Аналогично этому клинопироксен из базальтов СВСГ содержит меньше TiO_2 , чем S_{rx} из базальтов ЮВСГ, которые обогащены титаном по сравнению с породами СВСГ. Такая же зависимость от валового состава пород отмечается и для амфибола: магнезиальные андезиты вулканов Шивелуч и Заречный содержат более магнезиальный амфибол по сравнению с роговой обманкой из андезитов ЮВСГ [16].

РЕДКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ В ВУЛКАНИЧЕСКИХ ПОРОДАХ СЕВЕРНОЙ ГРУППЫ ВУЛКАНОВ

Как уже упоминалось выше, магнезиальные базальты СВСГ по ряду геохимических признаков отличаются от аналогичных пород ЮВСГ [16]. Эти особенности становятся более наглядными при сравнении всего спектра составов пород СВСГ и ЮВСГ. Действительно, первые из них по сравнению со вторыми обогащены Sr, обеднены Ca, Sc, Y, Yb и обладают повышенными величинами отношений Sr/Y, K/Ti, La/Yb, Zr/Y, Th/Yb, Ni/Sc, Cr/Sc при пониженной величине отношения Ca/Sr и U/Th (табл. 1, 2). Соответственно на различных корреляционных геохимических диаграммах фигуративные точки составов лав СВСГ и ЮВСГ занимают обособленные поля (рис. 3-5).

Вероятно различия в составе магм для СВСГ и ЮВСГ вызваны различиями в магматических источниках, включая вещество мантийного клина и вклад ряда компонентов из погружающейся плиты (как в виде флюда, так и в виде частичного расплава - из метаморфизованных океанических базальтов второго слоя и/или осадков первого слоя). Наличие такого потока расплава или флюида, метасоматически изменяющего вещество мантийного клина, подтверждается не только геохимическими данными по составу лав, но и присутствием высокомагнезиального амфибола и флогопита в ксенолитах ультраосновных пород на вулкане Шивелуч и несколько более железис-

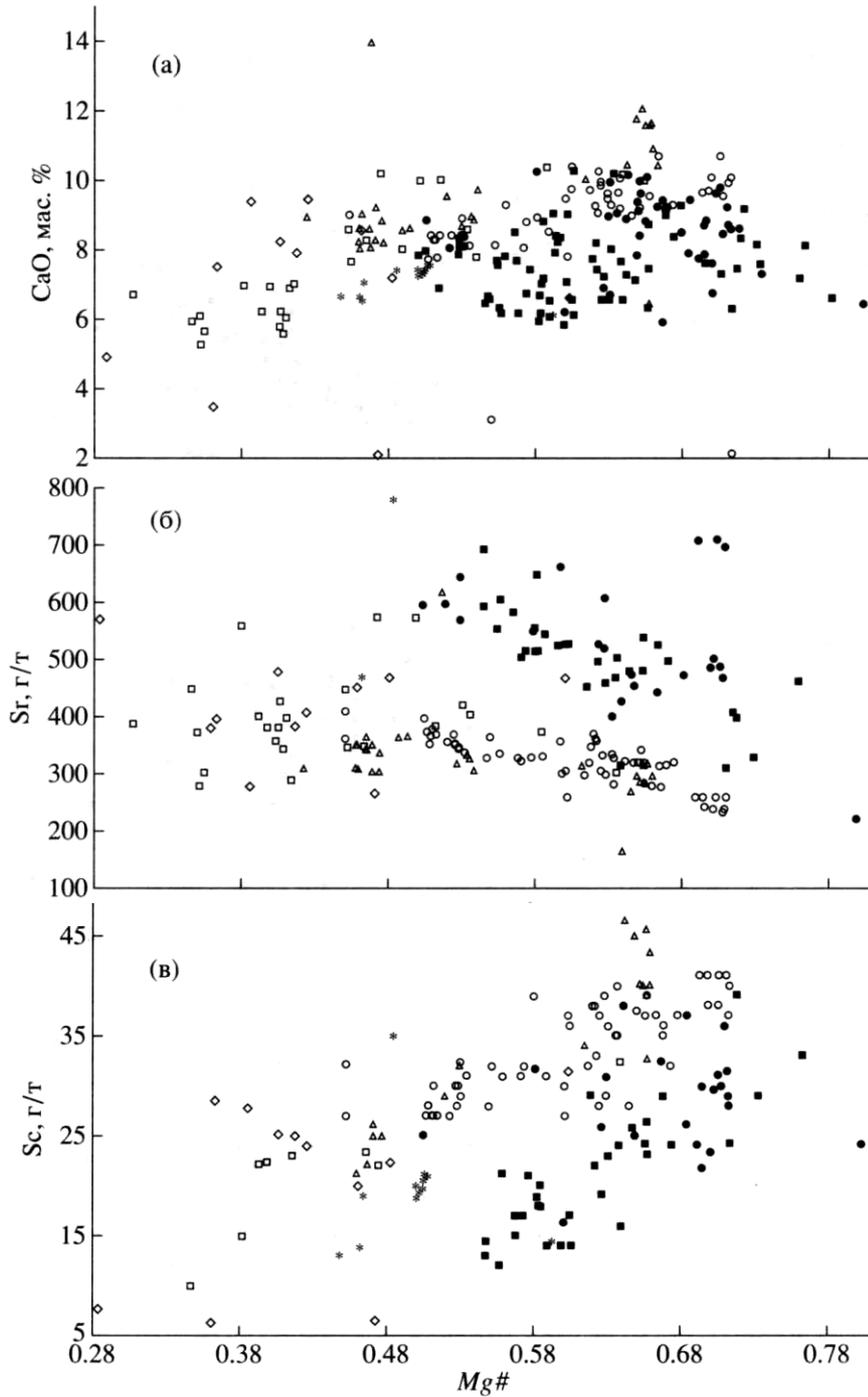


Рис. 3. Вариации содержаний CaO (а), Sr (б) и Sc (в) в вулканических породах в зависимости от их коэффициента магнeзиальности $Mg\# = MgO/(MgO + FeO_{общее})$, ат. %. Условные обозначения см. на рис. 2.

того амфибола в подобных ксенолитах на вулкане Ключевской [30].

Согласно последним геохимическим данным по содержанию в магматических породах вулканов Северной группы ^{10}Be [31, 32] и изотопов Rb [5, 9], влияние компонентов осадочного слоя субдуцируемой плиты на формирование магм в этом регионе крайне незначительно (менее 2%).

С другой стороны, смещение геохимических характеристик вулканических пород от ЮВСГ к СВСГ соответствует тренду обогащения мантийного источника частичными выплавками из субдуцируемой плиты. Идея об участии таких выплавок в генезисе магм вулканов Шивелуч и Харчинский была недавно высказана П. Кепежинскас с соавторами [9], правда на ограниченном факти-

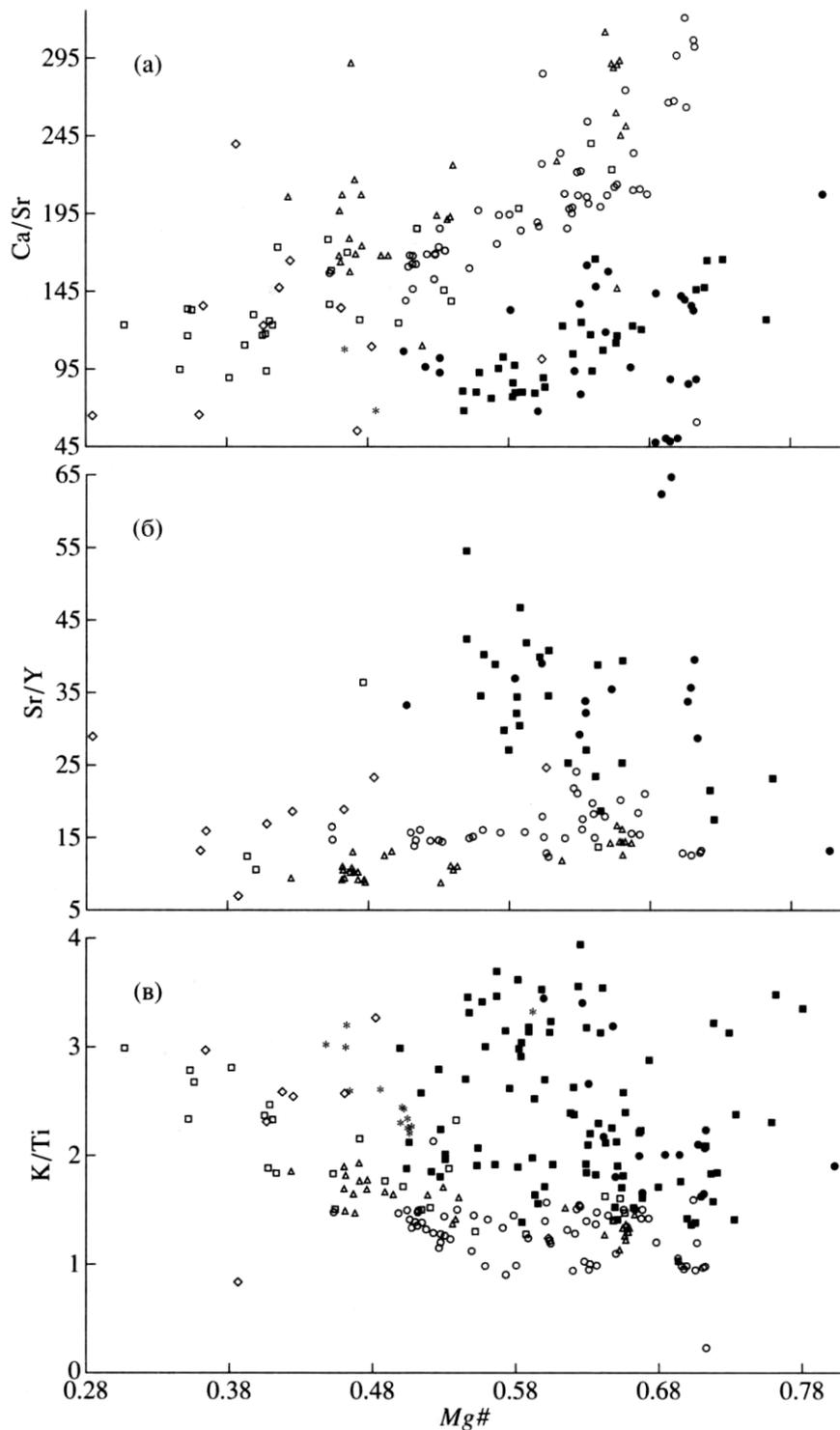


Рис. 4. Вариации отношений Ca/Sr (а), Sr/Y (б) и K/Ti (в) в вулканических породах в зависимости от их коэффициента магнезиальности. Условные обозначения см. на рис. 2.

ческом материале. Действительно, расплавы из субдуцируемой плиты формируются на уровне гранатсодержащих парагенезисов (при плавлении эклогитов или амфиболовых эклогитов) и, согласно расчетам на основании эксперименталь-

ных данных [33-38], обогащены Sr, но обеднены Yb, Y, Sc, Ti, имеют высокие значения La/Yb, Sr/Y, K/Ti, Ni/Sc, Cr/Sc и низкие - Ca/Sr и Ti/Sr отношений вследствие присутствия в рестите граната, сфена и отсутствия в нем плагиоклаза.

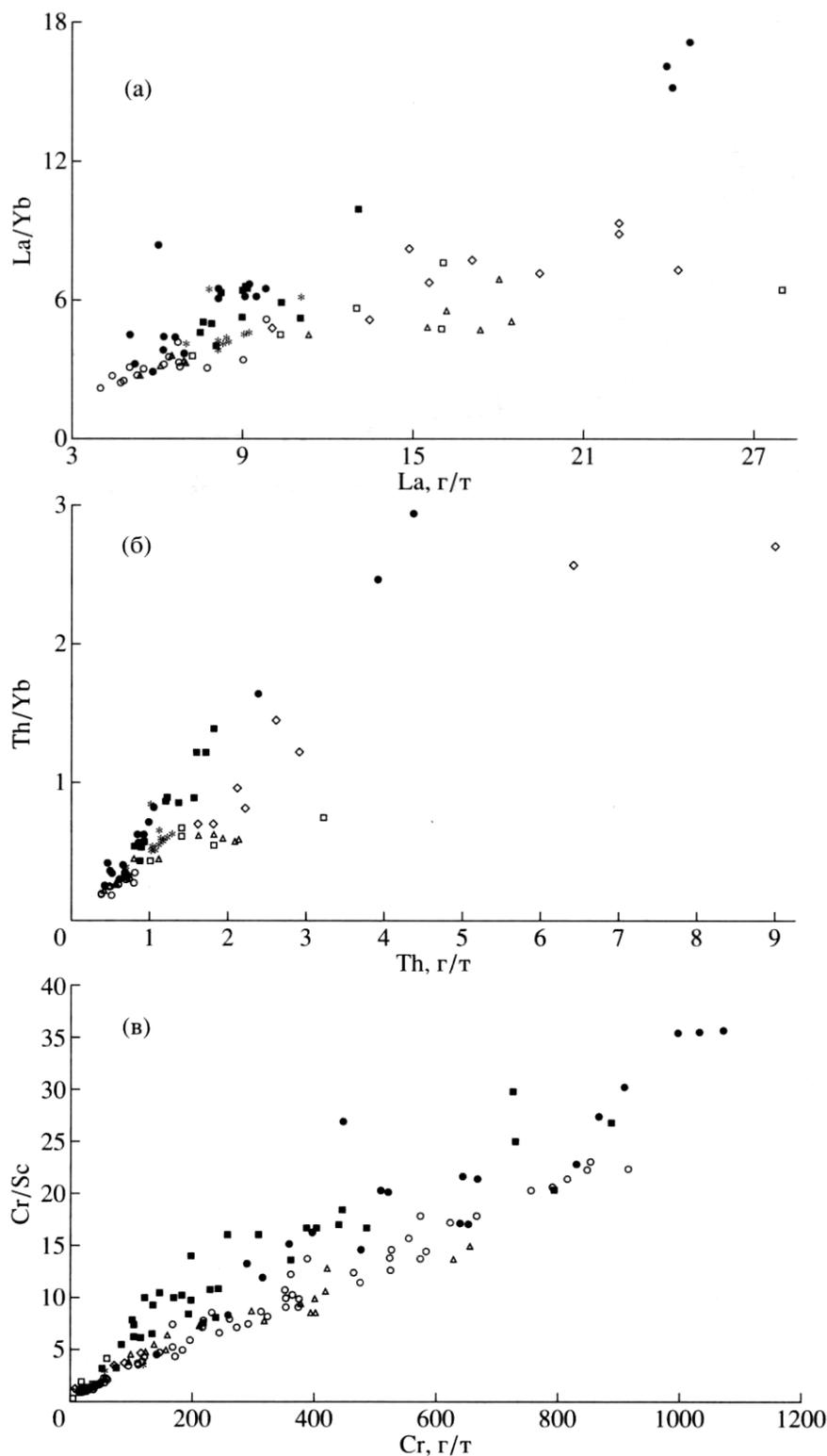


Рис. 5. Соотношение величин $La/Yb-La$ (а), $Th/Yb-Th$ (б) и $Cr/Sc-Cr$ (в) в вулканических породах. Условные обозначения см. на рис. 2.

Такие расплавы, названные М. Дефантом и М. Дрюммондом [34] "адакитами", имеют дацит-трондьемитовый валовый состав, высокие значения La/Yb (до 30-40) и Sr/Y (до 100-120) отноше-

ний, но низкую (3-4) величину отношения Ti/Sr [35], тогда как в типичных лавах островных дуг значения этих отношений составляют 5-15, 10—50 и 7-15 соответственно. Частичный расплав из

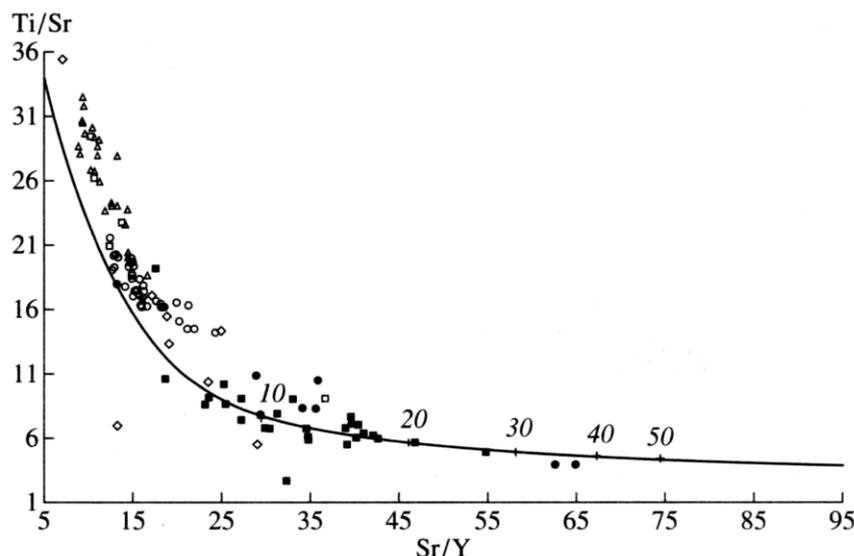


Рис. 6. Соотношение величин Ti/Sr и Sr/Y в вулканических породах. Показана линия смешения мантия-адакит. Цифры у кривой - доля адакитового расплава. Условные обозначения см. на рис. 2.

субдуцируемой плиты в результате взаимодействия с материалом мантийного клина становится более мафическим (до андезита). В нем растут магнезиальность и концентрации Sr и Ni , а величины отношений Ni/Sc и Sr/Sc падают. Помимо этого, тот же частичный расплав может метасоматизировать мантийный материал таким образом, что некоторые геохимические характеристики расплавов, возникающих при его частичном плавлении, будут иметь промежуточные значения между мантийными выплавками (высокие магнезиальность и содержания Sr и Ni) и адакитами (например, повышенные концентрации Sr и величины La/Yb и Sr/Y отношений). Эти частичные расплавы также могут иметь валовый состав андезита и принадлежать к магнезиальным андезитам [39]. Дж. Ягодзинским [38] Mg-андезиты первого типа (т.е. продукты кристаллизации частичного расплава из субдуцируемой плиты, контаминированного материалом мантийного клина) названы андезитами А-типа (по геохимическому прототипу с острова Адак, Центральные Алеуты), а Mg-андезиты второго типа (производные метасоматизированного мантийного клина) - андезитами П-типа (геохимический прототип - андезиты подводного вулкана Пийпа, Западные Алеуты). Согласно расчетам, для получения расплава магнезиального андезита П-типа к материалу мантийного клина должно быть добавлено примерно 4% адакитового расплава [37].

Напомним, что среди пород СВСГ присутствуют не только андезиты, но и базальты, которые обладают похожими геохимическими характеристиками (табл. 1, рис. 3-5). В одной из недавних работ [20] на основании геохимических данных

мы показали, что магнезиальные андезиты СВСГ едва ли являются фракционатами магмы Mg-базальта. Более вероятно их происхождение либо в результате AFC-процесса (ассимиляция-фракционирование-контаминация по модели [40]), когда магнезиальная базальтовая магма на небольших глубинах взаимодействует с веществом мантийного клина, либо за счет частичного плавления метасоматизированного материала мантийного клина, т.е. тот же процесс, что и для базальтов, но при более низкой степени частичного плавления.

Согласно расчетам по модели двухкомпонентного смешения магматические расплавы, по составу соответствующие базальтам и андезитам СВСГ, образовались при частичном плавлении материала мантийного клина с добавкой 5-15% адакитового расплава (рис. 6).

Относительно пород ЮВСГ можно сказать, что их геохимические характеристики указывают на участие флюида (но не расплава!) из субдуцируемой плиты в метасоматическом преобразовании материала мантийного клина, который позже испытывал частичное плавление. Надежным индикатором такого потока флюида (помимо вышеприведенных геохимических данных), является отношение U/Th , поскольку "...соотношение коэффициентов растворения этих элементов в водном флюиде таково ($D_U \gg D_{Th}$), что уран, а не торий мобилизуется флюидами, отделяющимися от субдуцируемой плиты" [41, стр. 564]. Имеющиеся данные (рис. 7) свидетельствуют, что лавы ЮВСГ нередко обладают более высокими значениями отношения U/Th , чем лавы СВСГ, при одинаковых значениях Sr/Th отношения.

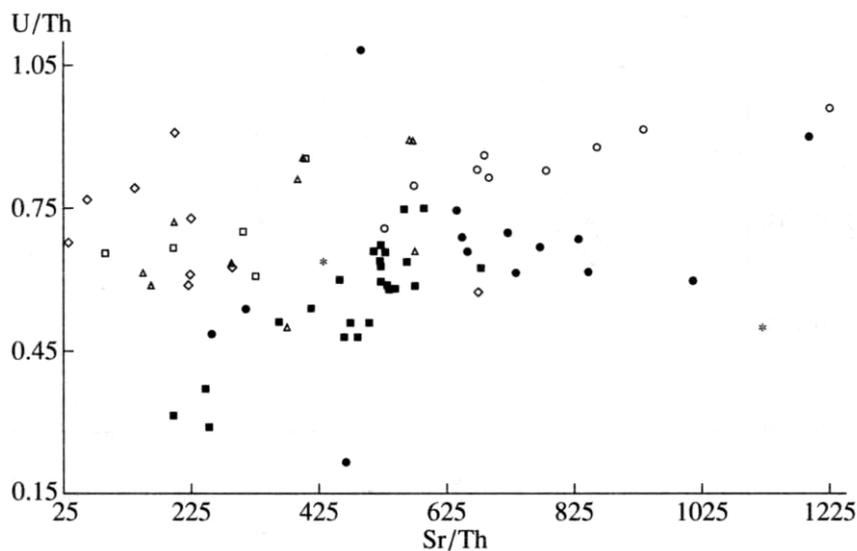


Рис. 7. Соотношение величин U/Th-Sr/Th в вулканических породах. Условные обозначения см. на рис. 2.

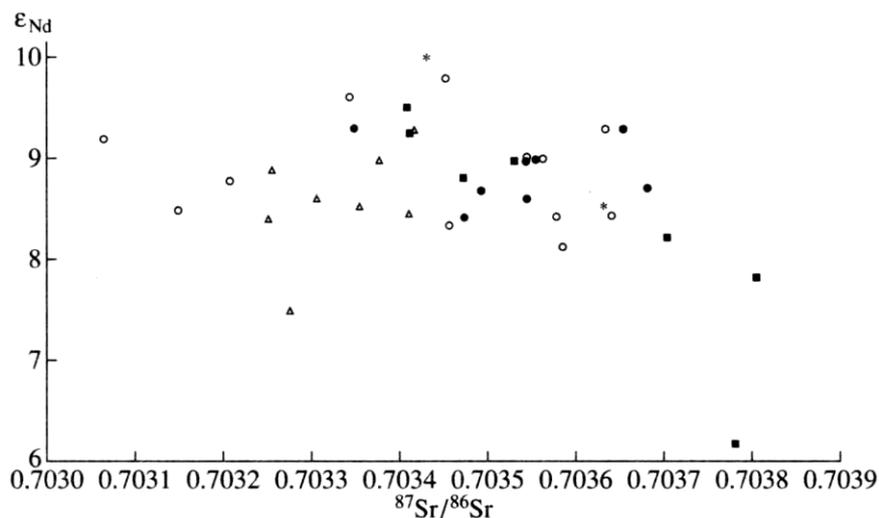


Рис. 8. Соотношение величин ϵ_{Nd} - $^{87}Sr/^{86}Sr$ в вулканических породах. Условные обозначения см. на рис. 2.

ИЗОТОПИЯ Sr И Nd В ВУЛКАНИТАХ

Вариации изотопного состава Sr и Nd в лавах СВСГ и ЮВСГ перекрываются. Они лежат в пределах обычных для островодужных вулканитов значений, будучи, однако, ближе к соответствующим характеристикам пород энсиматических, чем энсиалических островных дуг (табл. 1, 2). В то же время ковариации значений изотопных отношений Sr и Nd как друг с другом, так и рядом главных и редких элементов и их отношениями для пород СВСГ и ЮВСГ различны. К примеру, величины $^{87}Sr/^{86}Sr$ отношения и ϵ_{Nd} в лавах СВСГ связаны отчетливой отрицательной корреляцией, тогда как в лавах ЮВСГ корреляция между ними практически отсутствует (рис. 8). На диа-

грамме $SiO_2 - ^{87}Sr/^{86}Sr$ (рис. 9А) параметры коррелируются для пород основного состава, однако для более кислых корреляция отсутствует. К тому же корреляция между этими параметрами для базальтов СВСГ отрицательная, а для базальтов ЮВСГ - положительная. При этом для базальтов величины отношения $^{87}Sr/^{86}Sr$ выше в породах СВСГ, а для андезитобазальтов и андезитов - в породах ЮВСГ. Значения ϵ_{Nd} в лавах СВСГ коррелируются с содержаниями SiO_2 (прямая зависимость) и величинами Sm/Nd отношения (обратная зависимость), а значения $^{87}Sr/^{86}Sr$ - с содержаниями Sr (прямая зависимость), однако такая зависимость не найдена для пород ЮВСГ (рис. 9б). Наконец, для пород СВСГ и ЮВСГ проявляются

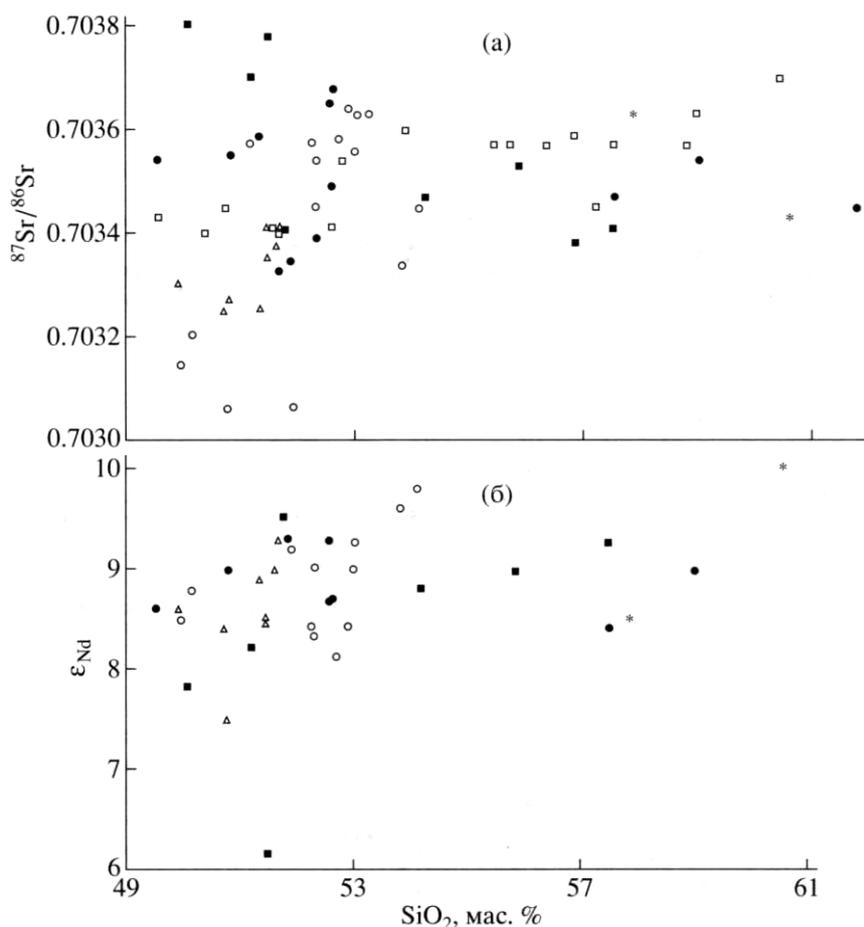


Рис. 9. Ковариации содержания SiO_2 и величин $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (а) и ϵNd (б) в вулканических породах. Условные обозначения см. на рис. 2.

противоположные тенденции в ковариациях значений $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ отношения с величинами отношений K/Ba , Sr/Y , Sr/Zr .

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Все имеющиеся изотопные и геохимические данные подтверждают наличие двухкомпонентных источников магматических расплавов. Для пород СВСГ один источник имеет высокие значения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, Sm/Nd , K/Ba и магнезиальности при низких ϵNd , SiO_2 , Sr , Sr/Y , Sr/Zr и может соответствовать ультраосновному мантийному веществу. Необычные изотопные характеристики этого мантийного вещества могут быть следствием предыдущих процессов метасоматоза и отчасти подтверждаются данными для ультраосновных ксенолитов в лавах СВСГ (табл. 1). Второй источник для этих пород имеет противоположные характеристики: низкие значения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ и высокие - ϵNd при высоких SiO_2 , Sr , Sr/Y , Sr/Zr и низких Sm/Nd , K/Ba и магнезиальности и по этим показателям соответствует адакиту [35] или магнезиальному андезиту А-типа [38]. Однако расчеты модели двухкомпо-

нентного смешения показывают, что этот источник должен иметь величину $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ отношения порядка 0.7033, а не 0.7028, как в Mg-андезитах А-типа из Западных Алеут [38].

Источники для лав ЮВСГ имеют другие изотопные и редкоземельные характеристики. Высокомагнезиальный и низкокремнеземистый источник (ультраосновной мантийный материал) обладает низкой величиной $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ и умеренно высоким значением ϵNd . Более кремнеземистый источник (флюид из субдуцируемой плиты) имеет высокие величины $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ при значениях ϵNd , близких к таковым в ультраосновном источнике. По сравнению с адакитоподобным источником для пород СВСГ, второй источник для лав ЮВСГ содержит гораздо меньше Sr и имеет существенно более низкие величины отношений Sr/Y и Sr/Zr . Причины появления различий в изотопном составе мантийного материала под СВСГ и ЮВСГ пока не ясны и требуют специального исследования. Для этого, в первую очередь, необходимо сравнительное изучение изотопного состава ультраосновных включений в лавах этих вулканов.

НЕКОТОРЫЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ СЛЕДСТВИЯ

В случае корректности сделанного нами вывода о различных магматических источниках для лав СВСГ и ЮВСГ могут быть сделаны важные заключения о геодинамических условиях субдукции в этом регионе.

Широко распространено мнение, что частичное плавление субдуцируемой плиты в молодых островных дугах и активных континентальных окраинах не является распространенным процессом, в то время как метасоматическое преобразование вещества мантийного клина флюидами из погружающейся плиты происходит повсеместно. При этом также предполагается, что частичное плавление плиты связано с особыми условиями субдукции: это может быть либо субдукция молодой (моложе 5-15 млн. лет) океанической литосферы [34], либо медленная наклонная субдукция [37, 38], либо субдукция океанического хребта [42].

СВСГ располагаются на продолжении сочленения Алеутской и Курило-Камчатской островных дуг и, возможно, косая пологая субдукция, характерная для Западных Алеут, захватывает и этот регион. Последнее тем более вероятно, поскольку на западном продолжении Алеутского желоба обычны проявления субширотных тектонических дислокаций сдвигового типа [23], отделяющих СВСГ от ЮВСГ. Добавим к этому, что территория, расположенная севернее Алеутско-Камчатского сочленения, имеет молодую базальтовую кору, сформированную при раскрытии Командорского глубоководного бассейна [23, 24], которая погружается под Северную Камчатку [35]. Согласно вышеупомянутым сейсмологическим данным [25], субдукционная плита под СВСГ располагается на меньшей глубине и имеет меньший наклон, чем в районе расположения ЮВСГ. Возможно, это связано с субдукцией более прогретого и легкого литосферного блока на северном окончании Курило-Камчатской дуги, чем на ее южных участках [23]. Согласно данным Н.И. Селиверстова [23], подводные структуры западного окончания Алеутской дуги, в том числе и склоны этой части Алеутского желоба, отличаются повышенным тепловым потоком, вызванным недавней тектоно-магматической активизацией литосферы в этом регионе. Следует отметить, что, по мнению этого исследователя, активизированная литосфера захватывает и поднятие Обручева, западное продолжение которого субдуцируется под ЮВСГ.

ВЫВОДЫ

1. Изучение минералогических, геохимических и изотопных особенностей вулканических пород Северной группы вулканов на Камчатке по-

казало гетерогенность их составов. Были установлены две ассоциации вулканов: в одну входят вулканы, расположенные севернее реки Камчатка - СВСГ (вулканы Шивелуч, Заречный, Харчинский и Харчинская региональная зона шлаковых конусов), в другую - вулканы, находящиеся южнее реки Камчатка - ЮВСГ (вулканы Ключевской, Плоские сопки, Толбачик, Николка и др., а также Толбачинская и Плоских сопки зоны шлаковых конусов).

2. Вулканические породы СВСГ отличаются от эффузивов ЮВСГ высокой магнезиальностью (в целом) и повышенным содержанием Sr, при пониженном содержании Ca, Sc, Y, Yb, а также высокими величинами Sr/Y, K/Ti, La/Yb, Zr/Y, Th/Yb, Ni/Sc, Cr/Sc и низкими - Ca/Sr и U/Th отношений. Вариации изотопных отношений Sr и Nd в породах обеих ассоциаций вулканов перекрываются. При этом ковариации изотопных характеристик как между собой, так и с некоторыми главными и редкими элементами для пород выделенных ассоциаций различны.

3. Вероятно, в метасоматическом преобразовании материала мантийного клина в случае СВСГ участвовали частичные расплавы из субдуцируемой плиты, тогда как на ЮВСГ метасоматоз мантийного вещества протекал под воздействием флюида из субдуцируемой плиты.

4. Условия субдукции для вулканов двух ассоциаций резко различны. Возможно, под СВСГ условия субдукции подобны таковым для Западных Алеут (косая, пологая и медленная), в то время как под ЮВСГ имеет место ортогональная субдукция древней океанической коры.

Авторы благодарят А.А. Агапову (ИГЕМ РАН) за помощь в изотопных исследованиях, проф. Ф. Кайла (Институт горного дела и технологий, США) и проф. Д. Бейли (Копенгагенский университет, Дания) за определение в ряде образцов редких и редкоземельных элементов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 96-05-65227 и № 96-05-64545).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чурикова Т.Г., Соколов А.Ю. Магматическая эволюция вулкана Плоские сопки, Камчатка (анализ изотопной геохимии стронция) // Геохимия. 1993. № 10. С. 1439-1448.
2. Арискин А.А., Бармина Г.С., Озеров А.Ю., Нильсен Р.Л. Генезис высокоглиноземистых базальтов Ключевского вулкана // Петрология. 1995. Т. 3. №5. С. 496-521.
3. Озеров А.Ю., Арискин А.А., Кайл Ф. и др. Петролого-геохимическая модель генетического родства базальтового и андезитового магматизма вулканов Ключевской и Безымянный, Камчатка // Петрология. 1997. Т. 5. № 6. С. 614-635.

4. Kersting A.B., Arculus R.J. Klyuchevskoy volcano, Kamchatka, Russia: the role of high-flux recharge, tapped, and fractionated magma chamber(s) in the genesis of high-Al₂O₃ from high-MgO basalt // *J. Petrol.* 1994. V. 35. P. 1-41.
5. Kersting A.B., Arculus R.J. Pb isotope composition of Kluchevskoy volcano, Kamchatka and North Pacific sediments: implication for magma genesis and crustal recycling in the Kamchatka arc // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1995. V. 136. P. 133-148.
6. Vinogradov V.I. Isotopic evidence of the conversion of oceanic crust to continental crust in the continent-ocean transition zone of Kamchatka // *Geochem. Internat.* 1995. V. 32. P. 70-109.
7. Tatsumi Y., Kogiso T., Nohda S. Formation of a third volcanic chain in Kamchatka: generation of unusual subducted related magmas // *Contribs Mineral. and Petrol.* 1995. V. 120. P. 117-128.
8. Hochstaedter A., Kepzhinskas P., Defant M.J. et al. Insights into the volcanic arc mantle wedge from magnesian lavas from the Kamchatka arc // *J. Geophys. Research.* 1996. V. 101. № B1. P. 697-712.
9. Kepzhinskas P., McDermott F., Defant M.J. et al. Trace element and Sr-Nd-Pb isotopic constrains on a threecomponent model of Kamchatka arc petrogenesis // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* 1997. V. 61. № 3. P. 577-600.
10. Леонова Л.Л., Кирсанов И.Т. Геохимия базальтов Ключевского вулкана // *Геохимия.* 1974. № 6. С. 875-884.
11. Хедж К.Е., Горшков Г. С. Изотопный состав стронция в вулканических породах Камчатки // *Докл. АН СССР.* 1977. Т. 230. № 6. С. 1200-1203.
12. Пополитов Э.И., Волынец О.Н. Геохимические особенности четвертичного вулканизма Курило-Камчатской островной дуги и некоторые вопросы петрогенезиса. Новосибирск: Наука, 1981. 182 с.
13. Волынец О.Н., Флеров Г.Б., Шанцер А.Е., Мелекесцев И.В. Курило-Камчатская дуга. Камчатский сегмент // В кн.: *Петрология и геохимия островных дуг и окраинных морей.* М.: Наука, 1987. С. 56-85.
14. Волынец О.Н., Пузанков Ю.М., Аношин Г.Н. Геохимия неоген-четвертичных вулканических серий Камчатки // В кн.: *Геохимическая типизация магматических и метаморфических пород Камчатки.* Труды Института геологии и геофизики СО АН СССР. Вып. 390. Новосибирск. 1990. С. 73-144.
15. Хренов А.П., Антипин В.С., Чувашева Л.А., Смирнова Е.В. Петрохимические и геохимические особенности базальтов Ключевского вулкана // *Вулканонология и сейсмология.* 1989. № 3. С. 3-15.
16. Волынец О.Н., Мелекесцев И.В., Пономарева В.В., Ягодзински Дж.М. Харчинский и Заречный вулканы - уникальные центры позднеплейстоценовых магнезиальных базальтов на Камчатке. Часть II. Вещественный состав вулканических пород // *Вулканонология и сейсмология.* 1998₁.
17. Мелекесцев И.В., Волынец О.Н., Ермаков В.А. и др. Вулкан Шивелуч // В кн.: *Действующие вулканы Камчатки.* М.: Наука, 1991. Т. 1. С. 84-92.
18. Волынец О.Н., Мелекесцев И.В., Пономарева В.В., Ягодзински Дж.М. Харчинский и Заречный вулканы - уникальные центры позднеплейстоценовых магнезиальных базальтов на Камчатке. Часть I. Структурное положение, морфология, возраст и геологическое строение вулканов // *Вулканонология и сейсмология.* 1998₃. В печати.
19. Volynets O.N., Babansky A.D., Gol'tsman Yu.V., Agapova A.A. Variations of the Sr and Nd isotope composition in lavas from volcanoes of the North Volcanic Group, Kamchatka // In: *Geodynamic and evolution of the Earth (Materials of RFBR scientific conference).* Novosibirsk. 1996. P. 102.
20. Волынец О.Н., Пономарева В.В., Бабанский А.Д. Магнезиальные базальты андезитового вулкана Шивелуч, Камчатка // *Петрология.* 1997. Т. 5. № 2. С. 183-196.
21. Действующие вулканы Камчатки / Под ред. Федотов С.А., Масуренков Ю.П. М.: Наука, 1991. Т. 1. 302 с.
22. Ермаков В.А. Особенности развития вулканизма в тектонической структуре Курило-Камчатской островной дуги в новейшее (плиоцен-четвертичное) время // В кн.: *Очерки по тектоническому развитию Камчатки.* М.: Наука, 1987. С. 165-218.
23. Селиверстов Н.И. Строение дна акваторий и геодинамика зоны сочленений Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Автореферат дис. ... докт. геол.-мин. наук. 1997. М.: Институт океанологии, 48 с.
24. Baranov V.V., Seliverstov N.I., Murav'ev A.V., Muzirov E.L. The Komandorsky Basin as a product of spreading behind a transform plate boundary // *Tectonophysics.* 1991. V. 199. P. 237-269.
25. Федотов С.А. О механизме вулканической деятельности на Камчатке, Курило-Камчатской дуге и сходных структурах // *Действующие вулканы Камчатки.* М.: Наука, 1991. Т. 1. С. 18-35.
26. Мелекесцев И.В. Вулканизм и рельефообразование. М.: Наука, 1980. 212 с.
27. Брайцева О.А., Мелекесцев И.В., Флеров Г.Б. и др. Голоценовый вулканизм Толбачинской региональной зоны шлаковых конусов // В кн.: *Большое трещинное Толбачинское извержение 1975-76 гг.* М.: Наука, 1984. С. 177-223.
28. Miashiro A. Volcanic rock series in island arc and active continental margin // *Amer. J. Sci.* 1974. V. 274. P. 321-335.
29. Volynets O.N. Geochemical types, petrology and genesis of Late Cenozoic volcanic rocks from the Kurile-Kamchatka island-arc system // *Inter. Geol. Rev.* 1994. V. 36. P. 373-405.
30. Волынец О.Н., Ананьев В.В. Хромистые амфиболы и слюды ультраосновных включений в четвертичных лавах Камчатки и Курил // *Докл. АН СССР.* 1989. Т. 307. № 5. С. 1203-1206.
31. Tera F., Morris J., Tsvetkov A.A. 10Be/9Be and geochemistry of Kurile-Kamchatka arc // *29 IGC. Abstracts.* V. 3/3. P. 227-228.
32. Цветков А.А., Волынец О.Н., Моррис Дж. и др. Проблема субдукции осадков в свете данных по геохимии бериллия и бора в магматических породах переходной зоны океан-континент // *Известия АН СССР. Сер. геол.* 1991. № 11. С. 3-25.

33. *Kay R.W.* Aleutian magnesian andesites: melts from subducted Pacific ocean crust // *J. Volcanol. and Geotherm. Research*. 1978. V. 4. № 1. P. 117-132.
34. *Defant M.J., Drummond M.C.* Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere // *Nature*. 1990. V. 347. P. 662-665.
35. *Drummond M.C., Defant M.J., Kepezhinskas P.* Petrogenesis of slab-derived trondhjemit-tonalite-dacite-adakite magmas // *Transections of the Royal Society of Edinburgh Earth Sciences*. 1996. V. 85. P. 205-215.
36. *Volynets O.N., Koloskov A.V., Yagodinski G.M., Kay R.W.* Two types of magnesian andesites from the South part of Komandorsky Basin // In: *The 3 International Conference of Asian Seas*. Seoul. 1995. P. 204-205.
37. *Yagodinski G.M., Volynets O.N., Koloskov A.V. et al.* Magnesian andesite and the subducted component in a strongly calcoalkaline series at Piip Volcano, Far Western Aleutians // *J. Petrology*. 1994. V. 35. P. 1. P. 163-204.
38. *Yagodinski G.M., Kay R.M., Volynets O.N. et al.* Magnesian andesite in the western Aleutian Komondorsky region: implications for slab melting and processes in the mantle wedge // *Geol. Soc. Amer. Bull.* 1995. V. 107. №5. P. 505-519.
39. *Tatsumi Y.* Origin of high-magnesian andesites in the Setouchi volcanic belt, Southwest Japan II: Melting phase relations at high pressures // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1982. V. 60. P. 305-317.
40. *Kelemen P.B.* Reaction between ultramafic rock and fractionating basaltic magma. I. Phase relations, the origin of calc - alkaline magma series and the formation of discordant dunite // *J. Petrology*. 1990. V. 31. P. 51-98.
41. *Hawkesworth C.J., Turner S.P., McDermott F. et al.* U-Th isotopes in arc magmas: implication for trace element transfer from the subducted crust // *Science*. 1997. V. 276. P. 551-555.
42. *Saunders A.D., Rogers G., Marriner G.F. et al.* Geochemistry of Cenozoic volcanic rocks, Baja California, Mexico: Implications for petrogenesis of post subduction magmas // *J. Volcanol. and Geotherm. Research*. 1987. V. 32. P. 223-245.