

КАЙНОЗОЙСКИЙ ВУЛКАНИЗМ ЮЖНОЙ ЧАСТИ КОРЕИ

П.И. Федоров*, **Н.И. Филатова****, **С.И. Дриль*****, **К.Х. Чанг******, **С.О. Парк*******

**Геологический институт РАН, г. Москва*

***Институт литосферы окраинных и внутренних морей РАН, г. Москва*

****Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск*

*****Национальный Университет Кингпок, Тэгу, Корея*

Приводятся новые данные по химическому и изотопному составу стронция миоценовых (грабен Пхохан-Яннам) и плиоцен-четвертичных (о-в Чечжудо) вулканических комплексов южной части Кореи, связанных с обстановками растяжения. Раннемиоценовые вулканиты зоны Яннам дифференцированы от базальтов до дацитов и характеризуются повышенными концентрациями (HFSE), часто превышающими таковые в E-MORB, высокими La_n/Yb_n -отношениями и отчетливым Ta-Nb минимумом, а также заметно варьирующими величинами $^{87}Sr/^{86}Sr=0,7041-0,7048$ и, по данным [Shimazu et al., 1990; Song et al., 1997], $^{143}Nd/^{144}Nd=0,512643-0,512843$. Среднемиоценовые базальты зоны Пхохан отличаются высокой щелочностью, высокими концентрациями LILE, превышающими таковые в базальтах океанических островов и близкими к последним по содержаниям HFSE. Величины $^{87}Sr/^{86}Sr$ в этой группе пород близки к таковым в раннемиоценовых вулканитах Пхохан и варьируют в интервале 0,7044–0,7045, а значения $^{143}Nd/^{144}Nd$ – в пределах от 0,512831 до 0,512845 [Shimazu et al., 1990; Song et al., 1997]. Плиоцен-четвертичные вулканиты о-ва Чечжудо представлены щелочными базальтоидами при незначительном развитии толеитов, а также трахитами. Базальтоидам свойственно сильное обогащение некогерентными элементами, устойчивый Ta-Nb максимум, сильное фракционирование REE, характеризующее их как породы внутриплитной щелочной серии. Толеиты о-ва Чечжудо, характеризуясь высокими концентрациями LILE и HFSE, отличаются изменчивым поведением Ta-Nb аномалии. Для толеитов, щелочных базальтов и трахитов характерен интервал вариаций величины $^{87}Sr/^{86}Sr=0,7040-0,7044$.

Вариации состава кайнозойских вулканитов южной части Корейского региона позволяют сделать вывод о различной природе магмогенерирующих источников. Так, образование раннемиоценовых толеитов зоны Яннам связывается со смешением деплетированного и субдукционного компонентов; генезис среднемиоценовых щелочных базальтов зоны Пхохан определяется внутриплитным источником, близким по изотопному составу толеитам зоны Яннам; формирование плиоцен-четвертичных и четвертичных базальтов о-ва Чечжудо связано со смешением компонентов деплетированного и внутриплитного источников.

Ключевые слова: вулканизм, геохимия, миоцен, плиоцен – квартал, Корея.

Миоценовые и плиоцен-четвертичные вулканические породы на юге Корейского п-ова и прилегающих островах Цусимского (Корейского пролива) слагают ряд ареалов, наиболее крупные из которых известны в грабене Пхохан-Яннам и на о-ве Чечжудо (рис. 1). Являясь постсубдукционными по времени образования, вулканиды генетически связаны с режимом растяжения и деструкции края Азиатского континента. Полученные новые прецизионные данные по химизму этих вулканических образований позволили выявить гетерогенность состава вулканических пород, проследить тенденцию изменения их составов во времени и перейти к проблеме определения характера магматических источников.

Химический состав пород был исследован в лабораториях Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН. Содержания петрогенных компонентов определялись рентгено-флуоресцентным методом, редкоземельных и редких элементов (за исключением бора) – методом ICP-MS, содержания бора – оптико-эмиссионным методом. Изотопный анализ стронция проводился в двухленточном режиме на многоколлекторном масс-спектрометре Finnigan MAT-262 (Центр коллективного пользования ИЗК СО РАН, ИГХ СО РАН и БГИ СО РАН, г.Иркутск). Подготовка проб к масс-спектрометрическому анализу осуществлялась по методике, описанной в [1]. В период проведения измерений для стандарта NBS-987 получено следующее значение изотопного отно-

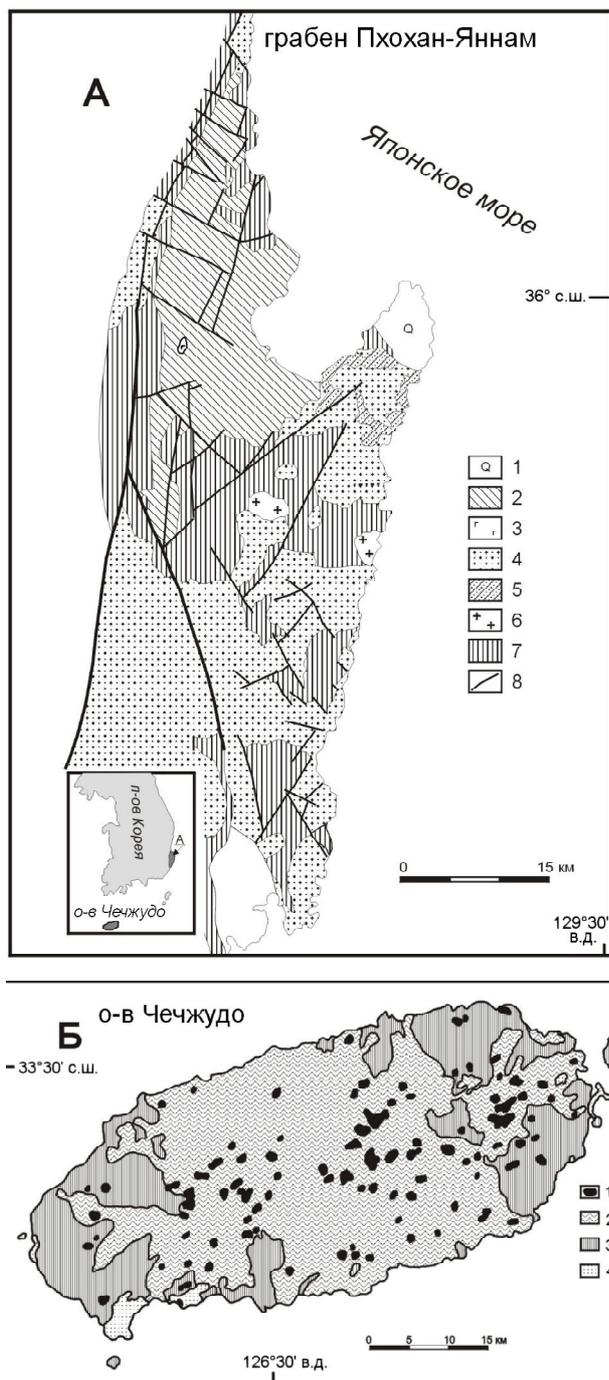


Рис. 1. Схема геологического строения грабена Пхохан-Яннам и о-ва Чечжудо юго-восточной части Кореи.

А. Грабен Пхохан-Яннам [22]. 1 – современные аллювиальные отложения; 2–3 – зона Пхохан: 2 – среднемиоценовые осадочные и вулканогенно-осадочные отложения, 3 – базальты; 4–5 – зона Яннам, раннемиоценовые образования: 4 – преимущественно осадочные, 5 – вулканические; 6 – граниты основания; 7 – меловые – палеоценовые вулканогенные и осадочные образования основания; 8 – разрывные нарушения.

Б. О-в Чечжудо [12, 22]. 1 – шлаковые конусы, 2 – щитовой вулкан, 3 – лавовое плато, 4 – осадочные породы.

шения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0,710301\pm 10$ (погрешности отвечают 2σ среднего, $n=8$) при рекомендованном значении $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0,71025$ [5]. Нормирование измеренных величин изотопных отношений $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в пробах к рекомендованному значению изотопного стандарта NBS-987 не проводилось.

ХАРАКТЕРИСТИКА КАЙНОЗОЙСКИХ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ОБРАЗОВАНИЙ

В ограниченном разломами миоценовом грабене Пхохан-Яннам северо-восточной ориентировки (рис. 1А) выделяются две разновозрастные зоны – раннемиоценовая Яннам на юго-востоке и среднемиоценовая Пхохан на северо-западе грабена.

Зона Яннам образована чередованием терригенно-туфогенных пород и эффузивов, несогласно, с конгломератами в основании, залегающих на меловых – палеоценовых вулканитах Корейско-Японского окраинно-континентального вулканического пояса. Изотопные К-Аг возрасты эффузивов зоны Яннам охватывают интервал 22,6–14,6 млн лет. Наиболее молодая дата соответствует гидротермально измененному туфу, а преобладающие значения изотопных возрастов соответствуют раннему миоцену и лежат в пределах 22,4–17,0 млн лет [11, 18, 19].

Зона Пхохан образована трансгрессивной серией среднемиоценовых терригенных пород (конгломератов, песчаников, сланцев), большая часть которых представлена палеонтологически охарактеризованными морскими фациями [22 и др.]. Эти терригенные породы интродуцированы субвулканическими телами щелочных базальтов мощностью до 30 м [18], изотопный К-Аг возраст которых лежит в пределах 15,2–13,6 млн лет [19].

Раннемиоценовые вулканические образования зоны Яннам дифференцированы от базальтов до дацитов. Среди основных пород преобладают андезибазальты. В базальтах и андезибазальтах вкрапленники образованы оливином, часто замещенным сапонитовым и гематитовым агрегатами, а также клинопироксеном и плагиоклазом. Микрозернистая или микролитовая основная масса пород образована плагиоклазом, клинопироксеном, оливином, амфиболами, ульвошпинелью и гематитом. В андезитах и андезидацитах вкрапленники представлены плагиоклазом и амфиболами, а в микролитовой основной массе этих пород различаются клинопироксен, амфибол, плагиоклаз, ульвошпинель и ильменит.

Базальты и андезибазальты зоны Яннам по соотношению кремнезема, щелочей и железа принадлежат к умеренно калиевой толейтовой серии, в то время как андезидациты и дациты смещены в область известково-щелочных составов (рис. 2). Базальтам и андезибазальтам свойственны высокие содержания TiO_2 (1,2–1,6%; рис. 2б) и P_2O_5 (0,25–0,42), значитель-

Таблица. Представительные анализы кайнозойских вулканитов южной части Кореи.

Зона	Яннам						Пхохан	
номер	214-3	2	214-7	58	60	60а	119-1	3
№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8
SiO ₂	51,67	52,01	53,66	55,90	56,33	60,20	52,67	49,81
TiO ₂	1,28	1,25	0,98	0,88	0,77	0,81	2,25	1,99
Al ₂ O ₃	18,47	18,64	21,53	18,03	17,49	17,02	16,51	18,27
Fe ₂ O ₃	-	-	-	8,56	7,14	6,31	-	-
FeO	9,79	9,18	7,53	-	-	-	6,85	7,84
MnO	4,55	0,20	0,28	0,15	0,15	0,14	0,11	0,12
MgO	0,19	4,32	2,14	3,89	3,68	2,73	6,44	5,66
CaO	9,53	10,69	9,00	7,44	7,12	5,39	3,94	6,70
Na ₂ O	3,61	2,81	4,02	3,14	3,29	3,71	6,39	4,43
K ₂ O	0,62	0,64	0,61	1,35	0,81	2,05	3,13	3,62
P ₂ O ₅	0,29	0,25	0,26	0,24	0,19	0,16	1,71	1,57
П.П.П.	-	-	-	0,30	2,86	1,30	-	-
Сумма	100,00	99,99	100,00	99,88	99,83	99,82	100,00	100,01
Sc	-	-	29	23,9	19,3	16,9	22	-
Cs	-	-	-	1,7	10,2	1,5	-	-
Rb	17,2	11	13,4	32,4	49,2	53,5	46	61
Ba	190	-	425	397,3	317,2	339,8	1053	-
Sr	432,1	481	513,1	463,0	705,8	399,0	1252	1499
U	-	-	-	0,63	1,32	0,81	-	-
Th	3	-	2	2,91	4,80	5,35	14,0	-
Pb	-	-	-	12	11	12	-	-
B	-	-	-	15	13	10	-	-
Ta	-	-	-	1,59	0,47	0,36	8,0	-
Nb	-	6	-	5,16	4,85	5,25	-	125
Hf	4	-	3	3,35	3,09	1,04	9,0	-
Zr	112	130	129	153,6	137,8	168	525	542
Y	26	25	31	25,1	20,5	20,1	23	33
La	11,73	9,6	12,1	16,60	18,63	19,99	80,13	84,3
Ce	26,55	-	22,64	27,20	39,58	43,49	152,21	-
Pr	4,79	-	4,13	4,33	4,28	4,27	15,87	-
Nd	20,99	-	17,53	20,71	18,85	20,09	58,15	-
Sm	5,77	4,1	4,67	4,52	3,83	4,15	9,13	9,2
Eu	1,70	0,9	1,45	1,28	1,11	1,14	2,75	2,8
Gd	6,27	-	5,46	4,41	3,65	3,83	7,07	-
Tb	0,94	-	0,81	0,63	0,53	0,59	0,91	-
Dy	-	-	-	4,00	3,25	3,19	-	-
Ho	1,18	-	1,1	0,80	0,70	0,64	0,90	-
Er	3,49	-	3,27	2,26	1,94	1,74	2,48	-
Tm	-	-	-	0,42	0,37	0,32	-	-
Yb	3,06	3,5	2,89	2,27	2,03	1,62	2,03	2,5
Lu	0,38	0,34	0,41	0,36	0,33	0,23	0,28	0,22
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr±2σ	0,70439	0,70413	0,70481	0,70468±5	0,70451±5	0,70472±8	0,70444	0,70439

но превосходящие таковые в базальтах мелового – раннекайнозойского Корейско-Японского окраинно-континентального пояса и сходные с концентрациями этих компонентов в толеитах океанических островов. Раннемиоценовые вулканиты показывают

“пилообразный” спектр распределения некогерентных элементов, нормированных по примитивной мантии [20] (рис. 3). Это свойственно надсубдукционным породам, что подчеркивается отчетливым Ta-Nb минимумом и заметным стронциевым максимумом

Таблица (продолжение).

номер	о. Чечжудо								
	73	74	76	77а	77	79	79-1	75	26-9
№ п/п	9	10	11	12	13	14	15	16	17
SiO ₂	50,62	50,89	51,65	53,61	49,72	48,73	47,80	51,78	48,11
TiO ₂	2,38	2,20	1,99	1,82	2,59	2,97	3,07	2,06	2,45
Al ₂ O ₃	15,75	14,94	14,27	17,28	16,86	16,62	16,60	14,98	15,24
Fe ₂ O ₃	11,99	11,90	11,93	10,54	12,46	12,87	13,41	11,37	12,25
FeO	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MnO	0,15	0,15	0,15	0,18	0,16	0,16	0,16	0,15	0,14
MgO	6,16	7,41	7,89	2,83	5,06	5,44	5,35	7,06	7,45
CaO	8,09	8,90	8,69	5,54	7,78	8,60	8,12	7,82	8,69
Na ₂ O	3,24	2,90	2,74	4,62	3,32	3,33	3,21	3,25	3,16
K ₂ O	1,48	0,80	0,64	2,90	1,48	1,27	1,28	1,39	1,08
P ₂ O ₅	0,45	0,31	0,23	1,06	0,54	0,49	0,50	0,39	0,53
П.П.П.	-	-	-	-	-	-	0,46	-	0,50
Сумма	100,31	100,40	100,18	100,38	99,97	100,48	99,96	100,25	99,60
Sc	19,2	23,2	23,4	8,9	18,2	19,4	19,7	19,0	-
Cs	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2	0,1	0,5	-
Rb	39,4	19,7	15,5	64,8	33,3	28,6	27,0	34,2	13,5
Ba	322,0	253,1	159,6	708,3	348,6	304,4	326,5	323,3	388,6
Sr	466,1	351,9	330,4	813,5	581,9	585,2	504,7	405,0	539
U	1,22	0,70	0,34	1,90	1,10	0,91	1,03	0,96	-
Th	6,40	4,01	2,05	10,92	5,94	4,99	5,13	5,65	3,02
Pb	2,0	2,0	2,4	3,3	2,3	2,8	3,8	1,9	-
B	4,3	3,5	5,1	5,4	2,9	2,5	2,1	4,2	-
Ta	2,58	1,36	0,89	4,26	2,41	2,34	2,21	2,11	-
Nb	47,92	25,29	16,02	117,73	44,27	41,63	39,05	37,55	34,1
Hf	5,17	4,22	3,14	7,79	5,32	5,05	4,97	5,37	4,88
Zr	211,2	166,7	134,8	354,3	220,4	194,0	187,0	223,9	183,3
Y	24,9	23,2	23,1	35,6	28,5	24,9	27,5	24,0	24,3
La	33,59	18,53	14,58	92,29	36,15	29,32	31,77	28,83	29,15
Ce	94,83	40,72	22,26	192,28	97,96	86,02	87,03	58,84	56,33
Pr	6,91	4,42	3,69	13,63	7,77	6,55	7,46	6,19	8,17
Nd	32,30	22,33	19,08	61,15	38,08	33,21	37,76	29,95	32,17
Sm	6,96	5,39	4,99	11,32	7,92	7,27	7,94	6,49	7,30
Eu	2,17	1,84	1,62	3,45	2,52	2,35	2,65	2,06	2,57
Gd	6,17	5,12	5,14	9,90	7,12	6,38	7,03	5,84	8,18
Tb	0,97	0,83	0,75	1,36	1,09	0,98	1,04	0,91	1,08
Dy	4,51	4,13	4,41	6,55	5,15	4,70	5,12	4,45	-
Ho	0,81	0,75	0,81	1,11	0,93	0,85	0,93	0,80	1,10
Er	2,15	2,04	1,97	2,93	2,40	2,19	2,38	2,08	2,65
Tm	0,36	0,35	0,32	0,53	0,42	0,36	0,40	0,36	-
Yb	1,82	1,69	1,59	2,62	1,90	1,81	1,96	1,71	2,07
Lu	0,23	0,23	0,24	0,35	0,27	0,26	0,28	0,23	0,24
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr±2σ	0,70427±13	0,70492±5	-	0,70447±6	0,70438±6	0,70447±5	-	0,70437±5	-

мом. На диаграмме Th-Hf-Ta (рис. 4) вулканы Яннам демонстрируют сильный разброс значений, располагаясь как в поле вулканитов активных континентальных окраин, так и внутриплитных базальтов. Распределение REE (рис. 5) слабо фракциони-

рованное в основных вулканиках ($La_n/Sm_n=0,8-2,4$; $La_n/Yb_n=1,5-5,5$) с отчетливым выположенным спектром распределения и более фракционированное в андезитах и дацитах ($La_n/Sm_n=2,3-2,9$; $La_n/Yb_n=4,2-6,9$; рис. 5) при незначительной отрицательной Eu

Таблица (окончание).

номер	о. Чечжудо					
	J-4	J-5	26-15	27-8	26-18	80
№ п/п	18	19	20	21	22	23
SiO ₂	49,28	50,00	53,46	57,6	62,18	63,95
TiO ₂	2,44	2,28	2,14	1,24	0,60	0,38
Al ₂ O ₃	15,70	14,41	16,25	17,62	17,83	18,88
Fe ₂ O ₃	11,95	13,06	11,58	8,50	5,43	3,36
FeO	-	-	-	-	-	-
MnO	0,15	0,15	0,15	0,13	0,18	0,26
MgO	6,24	6,60	2,79	1,73	0,81	0,22
CaO	7,68	8,74	5,83	3,88	2,68	2,10
Na ₂ O	3,59	4,40	4,54	5,20	5,54	5,48
K ₂ O	1,80	0,87	2,31	3,39	3,98	4,77
P ₂ O ₅	0,49	0,41	0,77	0,42	0,19	0,05
П.П.П.	0,68	-	0,37	0,02	0,38	-
Сумма	100,00	100,00	99,46	99,73	99,80	99,45
Sc	18	22,9	-	-	-	0,8
Cs	-	-	-	-	-	1,1
Rb	37	18,8	62,5	77,5	60,5	154,2
Ba	495	340	692,6	1010,2	996,6	1312,8
Sr	619	380	539,4	487,1	390,3	567,3
U	-	-	-	-	-	2,70
Th	-	2,9	7,02	10,29	10,78	13,09
Pb	-	-	-	-	-	5,9
B	-	-	-	-	-	6,4
Ta	-	1,5	-	-	-	5,34
Nb	44	-	59,5	79,5	93,1	164,62
Hf	-	4,2	8,16	11,07	8,84	2,87
Zr	233	200	369,7	518,8	287,6	100,8
Y	29	24,7	39,2	36,1	20,2	33,1
La	40,0	24,1	54,6	63,98	62,19	139,56
Ce	65,0	41,3	99,74	114,46	110,55	177,96
Pr	-	-	13,46	15,02	12,98	16,88
Nd	31,0	31,6	54,11	56,47	44,96	60,40
Sm	6,60	7,06	11,08	11,37	6,82	8,49
Eu	1,70	2,01	3,95	3,71	2,05	2,41
Gd	-	-	12,18	11,26	6,53	7,53
Tb	-	0,98	1,77	1,63	0,80	0,96
Dy	-	-	-	-	-	5,37
Ho	-	-	1,60	1,5	0,92	1,03
Er	-	-	3,94	3,93	6,29	2,68
Tm	-	-	-	-	-	0,49
Yb	1,60	2,04	3,11	3,33	3,12	2,60
Lu	-	-	0,43	0,41	0,37	0,42

Примечание. Образцы 1, 3 по [19]; 2, 7, 8 по [18]; 17, 20–22 по [13]; 18 по [16, 17]. “-” – не определялось или ниже чувствительности метода.

аномалии. Значения отношения Zr/Nb в породах высоки (22–33) и близки к таковым в базальтах N-MORB (Zr/Nb~30) (рис. 6А). Вулканиты зоны Яннам характеризуются довольно широкими вариациями величин как ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr=0,7041–0,7048 (рис. 6Б), так и,

по данным [18, 19], ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd=0,512643–0,512843 (рис. 6Б). При этом изотопный состав как стронция, так и неодима пород оказывается несколько деплетированным относительно хондритового резервуара (CHUR) или тождественным ему [4].

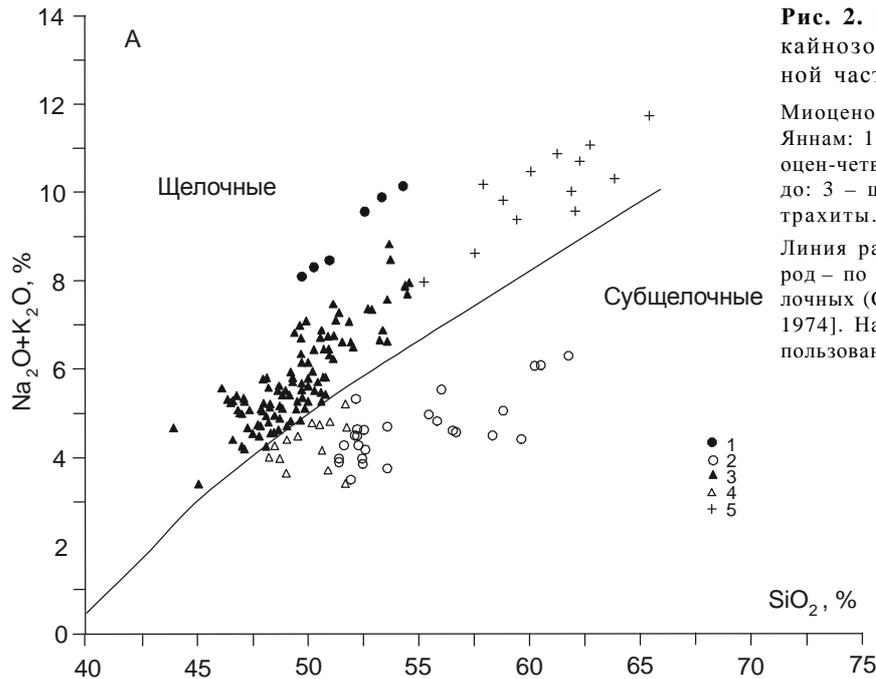
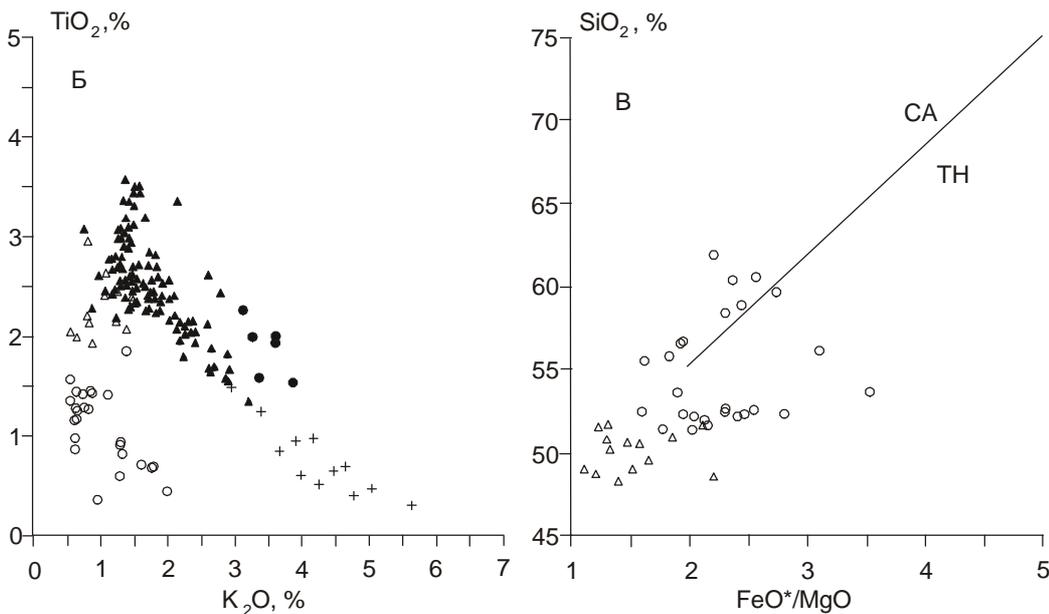


Рис. 2. Петрохимические характеристики кайнозойских вулканических пород южной части Кореи.

Миоценовый комплекс. 1–2 – грабен Пхохан-Яннам: 1 – зона Пхохан, 2 – зона Яннам. Плиоцен-четвертичный комплекс. 3–5 – о-в Чечжудо: 3 – щелочные базальты, 4 – толеиты, 5 – трахиты.

Линия раздела щелочных и субщелочных пород – по [Irvine, Baragar, 1971], известково-щелочных (СА) и толеитовых (ТН) – по [Miyashiro, 1974]. Наряду с оригинальными анализами использованы данные из [13, 16–19].



Среднемиоценовые щелочные базальты субвулканических тел зоны Пхохан во вкрапленниках содержат оливин (Fe_{72-77}), титанавгит ($En_{40-45}Wo_{39-48}Fs_{10-16}$; $TiO_2=1,9-4,3\%$), плагиоклаз (An_{65-60}). Структуры основной массы интерсертальная, долеритовая и серийно-порфировая. Вулканыты зоны Пхохан принадлежат щелочной серии (рис. 2). Породы обогащены LILE и LREE, Ta и Zr и на мультикомпонентной диаграмме отражают спектр распределения, свойственный базальтам OIB (рис. 3). Принадлежность базальтов зоны Пхохан к вулканикам внутриплитной геохимической специализации также подтверж-

дается расположением их фигуративных точек на диаграмме Th-Hf-Ta (рис. 4) и низкими Zr/Nb отношениями (3–7), типичными для внутриплитных базальтоидов. Спектр распределения REE сильно фракционированный. Величины отношений La_n/Sm_n и La_n/Yb_n (5,4–6,3 и 22–29, соответственно; рис. 5) аналогичны таковым во внутриплитных щелочных базальтах континентальных рифтов [8]. Значения $^{87}Sr/^{86}Sr$ варьируют от 0,7044 до 0,7045, а изотопов неодима, по данным [18, 19], – от 0,512831 до 0,512845.

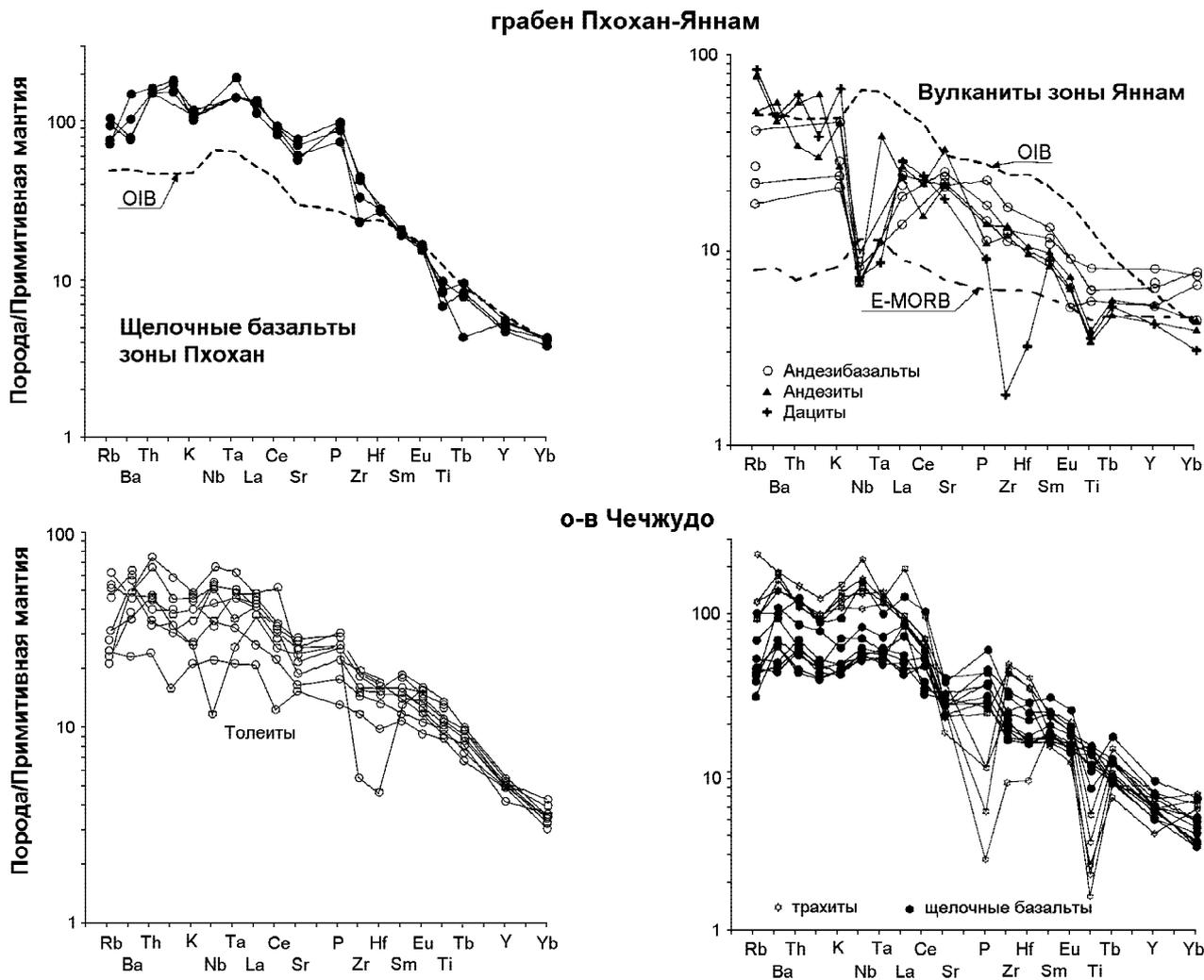


Рис. 3. Распределение несовместимых элементов в кайнозойских вулканических породах грабена Пхохан-Яннам и о-ва Чечжудо. Содержания некогерентных элементов в породах нормированы по примитивной мантии [20]. Наряду с оригинальными анализами использованы данные из [13, 16–19]. Данные о E-MORB, OIB по [20].

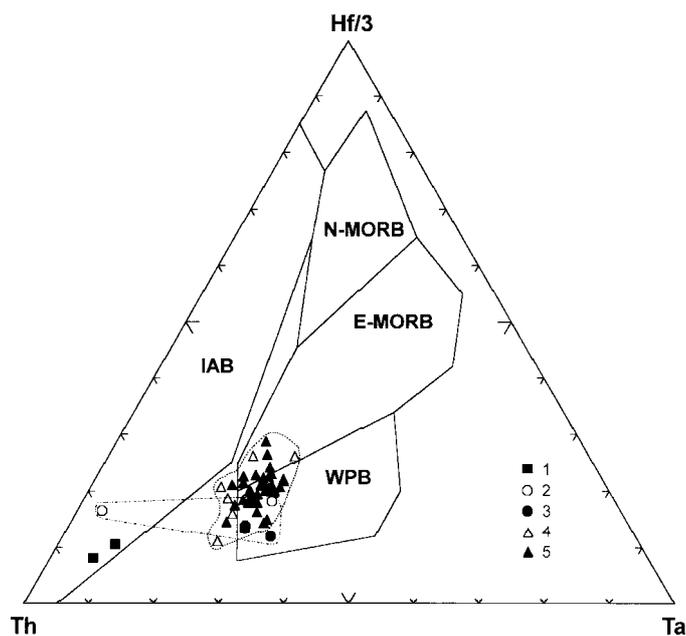


Рис. 4. Дискриминантная диаграмма Th-Hf-Ta для кайнозойских базальтов грабена Пхохан-Яннам и о-ва Чечжудо.

1 – Южно-Корейский мел-палеоценовый вулканический пояс; 2–3 – грабен Пхохан-Яннам: 2 – зона Яннам, 3 – зона Пхохан; плиоцен-четвертичный комплекс: 4–5 – о-в Чечжудо: 4 – толеиты, 5 – щелочные базальты.

Поля базальтов различных геодинамических обстановок [21]: N-MORB – деплетированных толеитов срединно-океанических хребтов, E-MORB – обогащенных толеитов срединно-океанических хребтов и толеитов внутриплитных структур, WPB – щелочных базальтов внутриплитных структур, IAB – островных дуг и активных континентальных окраин.

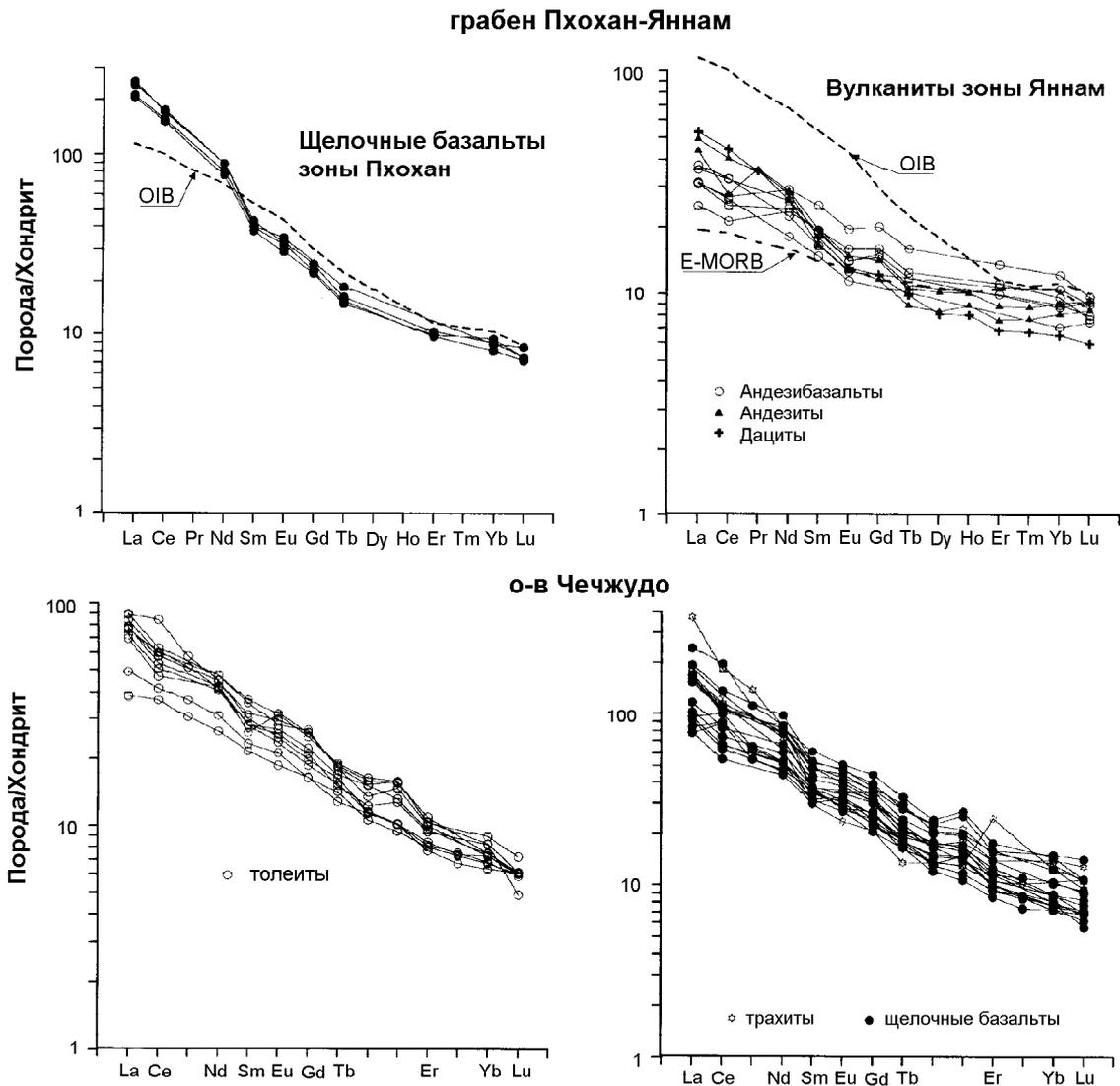


Рис. 5. Распределение редкоземельных элементов в кайнозойских вулканических породах грабена Пхохан-Яннам и о-ва Чечжудо.

На рисунках и в тексте содержания REE в породе нормированы по хондриту [15]. Наряду с оригинальными анализами использованы данные из [13, 16–19]. Данные о E-MORB, OIB по [20].

Плиоцен-четвертичный комплекс слагает также о-в Чечжудо, располагающийся к югу от п-ова Корея в Цусимском (Корейском) проливе (рис. 1Б). В составе комплекса по геологическим и стратиграфическим данным выделяют лавовое плато (верхний плиоцен – нижний плейстоцен), щитовой вулкан (плейстоцен) и шлаковые конусы (голоцен) [12].

Лавовое плато, слагающее нижнюю видимую часть острова, сформировано мощными (до 40–50 м) пакетами потоков щелочных оливиновых базальтов, трахитов и единичными потоками оливиновых толеитов. Над лавовым плато возвышается обширный щитовой вулкан, сложенный дифференцированным рядом пород от щелочных оливиновых ба-

зальтов к гавайитам и муджиеритам вплоть до трахитов при ограниченном распространении бенморитов [17]. Повсеместно развиты паразитические шлаковые конусы, образованные трахитами, реже щелочными оливиновыми базальтами.

Преобладающие на о-ве Чечжудо щелочные базальтоиды щитового вулкана представлены порфировыми и редкопорфировыми разностями. Вкрапленники в щелочных оливиновых базальтах образованы [16,17] оливином (Fe_{81-66}), авгитом и титанавгитом ($En_{40-45}Wo_{39-48}Fs_{10-16}$; $TiO_2=1,9-2,6\%$), а также плагиоклазом (An_{50-60}); в гавайитах – оливином (Fe_{81-55}), авгитом ($En_{41-46}Wo_{41-44}Fs_{11-14}$), плагиоклазом (An_{54-58}) и ильменитом; в муджиеритах – оливином (Fe_{73-47}), авгитом

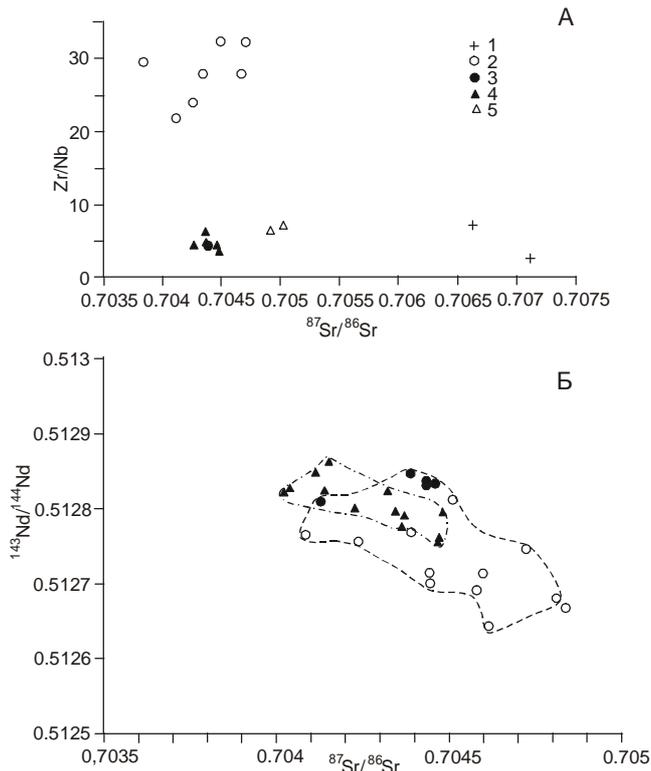


Рис. 6. Положение вулканитов грабена Пхохан-Яннам и о-ва Чечжудо на диаграммах $\text{Zr}/\text{Nb} - ^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (А) и $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} - ^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (Б) по [18, 19].

1 – Южно-Корейский мел-палеоценовый вулканический пояс; 2–3 – грабен Пхохан-Яннам: 2 – зона Яннам, 3 – зона Пхохан; 4–5 – о-в Чечжудо: 4 – щелочные базальты, 5 – толеиты.

($\text{En}_{38-42}\text{Wo}_{41-43}\text{Fs}_{16-19}$), плагиоклазом (An_{40-58}), апатитом, магнетитом и керсутитом. Основная масса базальтоидов сложена оливином (Fo_{74-39}), авгитом ($\text{En}_{44-29}\text{Wo}_{40-47}\text{Fs}_{13-28}$), плагиоклазом (An_{62-38}), магнетитом с мелкими выделениями апатита, ильменита, санидина и анортклаза. Структура основной массы интерсертальная, микрокристаллическая, реже пилотакситовая. Отмечается уменьшение содержания магния в клинопироксенах при сохранении содержания кальция и возрастании количества железа, что характерно для щелочных базальтоидов внутриплитных обстановок и отличает их от толеитов тех же обстановок.

Базальтоиды щелочной серии о-ва Чечжудо характеризуются умеренно высокими содержаниями щелочей ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 3,5-8,0\%$), высокими TiO_2 (1,8–3,6%), фосфора и пониженными концентрациями алюминия. Содержания переходных элементов широко варьируют (содержания Sr изменяются от 35 до 230 г/т, Ni – от 20 до 170 г/т, Co – от 20 до 47 г/т). Концентрации всех несовместимых элементов в по-

родах высокие (рис. 3), что характеризует последние как внутриплитные образования. Это подтверждается также низкими Th/Ta отношениями, расположением фигуративных точек базальтоидов на диаграмме Th-Hf-Ta (рис. 4), а также фракционированным распределением REE ($\text{La}_n/\text{Sm}_n = 1,8-4,9$; $\text{La}_n/\text{Yb}_n = 5-20$; рис. 5). Щелочные базальты характеризуются незначительными вариациями изотопного состава стронция ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,7040-0,7044$) и неодима ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0,51276-0,51286$) [9] при некоторой деплетированности изотопного состава обоих элементов относительно состава CHUR.

Немногочисленные базальты толеитовой серии о-ва Чечжудо отмечаются среди лавового плато. Это редкопорфировые породы с оливин-плагиоклаз-клинопироксеновой ассоциацией вкрапленников. Базальты характеризуются широкими вариациями содержаний SiO_2 (47,5–52%) и низкой щелочностью ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 2,5-5\%$; рис. 2а). Составы пород на диаграмме $\text{SiO}_2 - \text{FeO}^*/\text{MgO}$ (рис. 2в) располагаются в поле толеитовой серии, отвечая *ol*-нормативным толеитам. Содержание TiO_2 высокое (1,8–3,0%), слабо зависящее от щелочности и кремнеземистости (рис. 2б). Содержания крупноионных литофилов (LILE) относительно высокие, близкие таковым в толеитах E-MORB типа. Концентрации некоторых высокозарядных элементов (HFSE), таких как Zr, Hf, Ti, в рассматриваемых толеитах выше, чем в E-MORB, и приближаются к таковым во внутриплитных вулканитах. Толеитам свойственно обогащение HFSE относительно LILE, что отличает их от пород надсубдукционной обстановки. Однако для некоторой части составов толеитов о-ва Чечжудо свойственна отрицательная Ta-Nb и положительная Sr аномалии, что характерно для продуктов надсубдукционного вулканизма (рис. 3). Вместе с тем, на диаграмме Th-Hf-Ta (рис. 4) фигуративные точки толеитов смещены в область внутриплитных составов. Распределение REE менее фракционированное по сравнению с таковым в щелочных базальтоидах ($\text{La}_n/\text{Sm}_n = 2-4$; $\text{La}_n/\text{Yb}_n = 4-7$; рис. 5). Величины $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в толеитах несколько выше, чем в щелочных базальтах (0,7042–0,7050) [2].

Трахиты характеризуются афировой и редкопорфировой структурой. Субфенокристы образованы плагиоклазом, калиевым полевым шпатом, магнетитом; реже отмечаются зерна клинопироксена, циркона и оливина. Структура основной массы – трахитовая и витрокристаллическая. По соотношению щелочей и кремнезема (рис. 2а) трахиты принадлежат к щелочной серии. Они характеризуются крайне высокими содержаниями большинства несовместимых элементов (рис. 3) и фракционированным спектром распределения REE ($\text{La}_n/\text{Sm}_n = 4-5,5$; $\text{La}_n/\text{Yb}_n = 11-15$; рис. 5). Отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,70447$ в

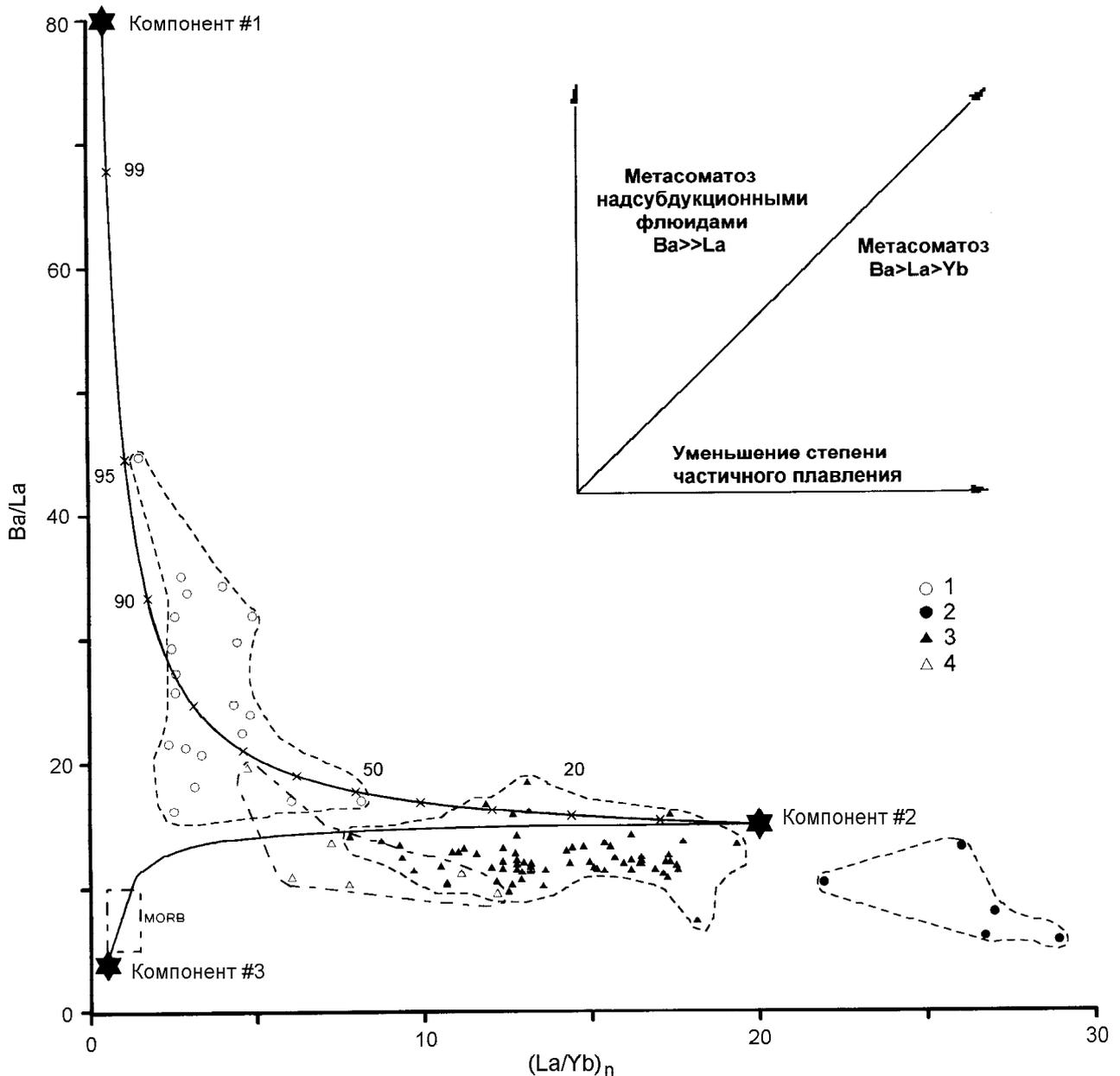


Рис. 7. Положение базальтоидов грабена Пхохан-Яннам и о-ва Чечжудо на диаграмме Ba/La – (La/Yb)_n. 1–2 – грабен Пхохан- Яннам: 1 – зона Яннам, 2 – зона Пхохан; 3–4 – о-в Чечжудо: 3 – щелочные базальты, 4 – толеиты. Объяснение компонентов см. в тексте.

трахитах близко к таковым в базальтоидах о-ва Чечжудо [2].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

П-ов Корея в южной части пересекается Южно-Корейско-Японским мел-палеоценовым окраинно-континентальным вулканическим поясом, формирование которого было обусловлено субдукцией Тихоокеанской плиты [3]. Нижние части разреза вулканического пояса представлены лавами и агломератовы-

ми туфами базальтового и андезитового состава, тогда как верхние – дацитами, риолитами, туфами кислого состава в ассоциации с многочисленными экстрезивными куполами. Вулканы пояса отличаются умеренной щелочностью, низкой железистостью, дифференцированным распределением несовместимых элементов при высоком содержании крупноионных литофилов (LILE) и дефиците HFSE, а также сильной отрицательной Ta-Nb аномалией, что характеризует их как надсубдукционные магматичес-

кие образования известково-щелочной серии. Высокие начальные отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (от 0,7055 до 0,7071) предполагают связь вулканитов как с мантийными, так и коровыми источниками.

Произошедшая в эоцене на востоке Азии смена окраинно-континентального вулканизма на рифтогенный сопровождалась изменением геохимических характеристик вулканитов. Прекращение субдукции океанической плиты под восточную окраину Азиатского континента в начале палеоцена и формирование на этой окраине зон растяжения в кайнозойе выразилось в уменьшении величин $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, что было обусловлено как прекращением влияния на генезис вулканитов субдукционного компонента, так и вовлечением по мере усиления процесса астеносферного материала (DM+EM I).

В южной части Корейского региона режим растяжения сопровождался тремя этапами вулканической деятельности: раннемиоценовым, среднемиоценовым (грабен Яннам-Пхохан), а также плиоцен-четвертичным (о-в Чечжудо).

В грабене Пхохан-Яннам разновозрастные миоценовые вулканиты принадлежат двум различным вулканическим сериям. В зоне Яннам раннемиоценовые вулканиты образуют дифференцированную базальт-дацитовую толеитовую серию. Базальтам зоны свойственны как умеренно повышенные содержания некогерентных элементов, слабо фракционированное распределение REE, сближающие их с толеитами E-MORB, так и "пилообразное" распределение некогерентных элементов на мультикомпонентной диаграмме с устойчивым Ta-Nb минимумом. Среднемиоценовые щелочные базальты зоны Пхохан отличаются высокими содержаниями LILE, HFSE и LREE с высокими La_n/Yb_n отношениями, что сближает их с составами внутриплитных щелочных базальтов. Все миоценовые породы грабена Пхохан-Яннам отличаются более высокими изотопными отношениями неодима по сравнению с базальтами других комплексов Кореи [9].

На о-ве Чечжудо щелочные базальтоиды и трахиты образуют большую часть нижнего лавового плато и возвышающийся над ним щитовой вулкан. Их формирование происходило в несколько циклов, образуя ряд дифференциации от щелочного оливинового базальта к гавайитам, муджиритам и трахитам [12], что подтверждается близостью изотопного состава стронция и неодима в ряду дифференциатов, а также отсутствием связи между величинами $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ и химическим составом пород в ряду дифференциации. Характерно также отсутствие значимых вещественных различий между вулканитами разных циклов. Щелочные базальтоиды о-ва Чечжудо характеризуются высокими концентрациями некогерентных элементов, выраженным Ta-Nb максимумом

на мультикомпонентной диаграмме, сильно фракционированным спектром распределения REE, что характеризует их как щелочную внутриплитную серию, сходную, например, со щелочными базальтами Гавайских о-вов [6, 10] и Эфиопского рифта [8].

Сложен вопрос о происхождении кислых щелочных вулканитов о-ва Чечжудо. Трахиты, вероятно, могут рассматриваться как крайние дифференциаты щелочной серии, что, в целом, подтверждается сходным с базальтоидами изотопным составом стронция и неодима [9].

Таким образом, кайнозойские комплексы южной части Корейского региона включают вулканические породы разных магматических серий, что предполагает участие в их генезисе нескольких магматических источников, соотношение в которых океанического деплетированного, обогащенного внутриплитного и субдукционного компонентов изменчиво. Качественную оценку процесса смешения компонентов различного состава и генезиса отражает диаграмма зависимости отношения Ba/La от $(\text{La}/\text{Yb})_n$, предложенная [14] (рис. 7). Первый, субдукционный, компонент, имеющий высокое значение $\text{Ba}/\text{La}=80$ и низкое $-\text{La}/\text{Yb}_n=0.5$, характеризует мантийный источник, метасоматически измененный в связи с субдукцией [14]. Второй компонент, с низким значением $\text{Ba}/\text{La}=15$ и высоким $\text{La}/\text{Yb}_n=20$, соответствует продуктам внутриплитного магматизма [7]. Третий компонент отвечает деплетированной океанической мантии [20].

Видно, что вулканиты отличаются сильной гетерогенностью, а их состав определяется как участием "чистых" компонентов источников, так и их смешением. В области смешения деплетированного (MORB-подобного) и субдукционного (LILE обогащенного) компонентов источника располагаются раннемиоценовые толеиты зоны Яннам. Среднемиоценовые щелочные базальты грабена Пхохан, отличаясь низкими Ba/La и высокими $(\text{La}/\text{Yb})_n$ отношениями, занимают область щелочных базальтоидов внутриплитной обстановки. Однако близость отношений $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ и $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ в базальтах толеитовой и щелочной серий грабена Пхохан-Яннам [18, 19] позволяет предположить, что их образование происходило из изотопно-гомогенного источника. Последующая эволюция расплавов (смешение, варьирующие степени плавления и близповерхностное фракционирование) привели в раннем миоцене к формированию толеитовых магм, а в среднем – щелочных.

Плиоцен-четвертичные базальты о-ва Чечжудо, располагаясь вдоль линии смешения внутриплитного и деплетированного компонентов, также характеризуются сильной гетерогенностью состава. Так, толеиты Чечжудо связаны с источником, содержащим большую долю деплетированного компонента, а ще-

лочные базальтоиды смещены в сторону внутриплитных составов (рис. 6).

В целом, миоценовый и плиоцен-четвертичный вулканизм на юге Корейского региона мог происходить при взаимодействии материала мантийного диапира с деплетированной MORB-подобной мантией, частично измененной субдукционными процессами на краю Азиатского континента в мезозойское – раннекайнозойское время.

ВЫВОДЫ

В южной части Корейского полуострова выделяются три этапа вулканической деятельности, связанных с обстановками растяжения: раннемиоценовый, среднемиоценовый и плиоцен-четвертичный. Раннемиоценовые вулканиды зоны Яннам дифференцированы от базальтов до дацитов и характеризуются повышенными концентрациями HFSE, часто превышающими уровень, характерный для E-MORB, высокими La_n/Yb_n -отношениями и отчетливым Ta-Nb минимумом. Среднемиоценовые базальты зоны Пхохан отличаются высокой щелочностью, высокими концентрациями LILE, превышающими таковые в OIB [20], и близкими к последним содержаниями HFSE. Плиоцен-четвертичные вулканиды о-ва Чечжудо дифференцированы от щелочных оливиновых базальтов и гавайитов до муджиеритов и бенморейтов, а также трахитов. Базанитоидам свойственно сильное обогащение некогерентными элементами, устойчивый Ta-Nb максимум, сильное фракционирование REE, характеризующее их как породы внутриплитной щелочной серии. Толейты о-ва Чечжудо, характеризуясь высокими концентрациями LILE и HFSE, отличаются изменчивым поведением Ta-Nb аномалии.

Вариации состава кайнозойских вулканидов южной части Корейского региона позволяют сделать вывод о различной природе магмогенерирующих источников. Так, образование раннемиоценовых толейтов зоны Яннам связывается со смешением деплетированной и субдукционной компонент источников; генезис среднемиоценовых щелочных базальтов зоны Пхохан определяется внутриплитным источником, по изотопному составу близким толейтам зоны Яннам; формирование плиоцен-четвертичных и четвертичных базальтов о-ва Чечжудо связано со смешением деплетированного и внутриплитного компонентов источника.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных исследований (гранты 99-05-65462 и 01-05-64019), ГНТП “Мировой океан”, а также при частичной финансовой поддержке Проекта 335 6-го молодежного конкурса

РАН. Мы признательны руководству Геологического института АН КНДР за сотрудничество при проведении многолетних полевых работ в Северной Корее. Мы благодарны проф. К.Х. Чангу, докторам С.О. Парк и Чж.Х. Хвану за совместные полевые экскурсии в южной части п-ова Корея и по о-ву Чечжудо, которые были субсидированы Фондом правительства Республики Корея.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пампура В.Д., Сандмирова Г.П. Геохимия и изотопный состав стронция в гидротермальных системах. Наука: Новосибирск, 1991. 111 с.
2. Федоров П.И., Филатова Н.И., Дриль С.И., Чанг К.Х. Меловой-кайнозойский вулканизм южной части Кореи // Щелочной магматизм Земли: Тр. науч. шк. М.: ГЕОХИ РАН, 2001. С. 65–67.
3. Филатова Н.И., Ким Зон Хи, Ким Хен Со. Тектоника Корейского полуострова // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1991. № 6. С. 131–144.
4. Фор Г. Основы изотопной геологии. М.: Мир, 1989. 585 с.
5. Чернышев И.В., Шатагин К. Н., Гольцман Ю.В. Высокоточная калибровка стандартных образцов изотопного состава стронция с помощью многоколлекторного масс-спектрометра // Геохимия. 2000. № 12. С. 1280–1285.
6. Chen C.Y., Frey F.A. Trace element and isotopic geochemistry of lavas from Haleakala volcano, east Maui, Hawaii: Implications for the origin of Hawaiian basalts // J. Geophys. Res. 1985. V. 90. P. 8743–8768.
7. Dixon T.H., Batiza R., Futa K., Martin D. Petrochemistry, age, and isotopic composition of alkali basalts from Ponape Island, western Pacific // Chemical Geology. 1984. V.43. P.1–28.
8. Hart W.K., Wolde G.G., Walter R.C. et al. Basaltic volcanism in Ethiopia: Constraints on continental rifting and mantle interactions // J. Geophys. Res. 1989. V. 94, N B6. P. 7731–7748.
9. Kim K.H., Tanaka T., Nagao K., Jang S.K. Nd and Sr isotopes and K-Ar ages of the Ulreungdo alkali volcanic rocks in the East Sea, South Korea // Geochem. J. 1999. V.33, N5. P.317–341.
10. Lanphere M.A., Frey F.A. Geochemical evolution of Kohala volcano, Hawaii // Contrib. Miner. Petrol. 1987. V.95, N 1. P. 100–113.
11. Lee J.S., Pouclet A. Le volcanisme Neogene de Pohang (SE Coree), nouvelles contraintes geochronologiques pour l'ouverture de la Mer du Japon // C. R. Acad. Sci. Paris. 1988. V.307. Ser.II. P.1405–1411.
12. Lee M.-W. Petrology and geochemistry of Cheju volcanic island, Korea // Sci. Rep. Tohoku Univ. 1982. Ser. 3. N 2. P. 177–256.
13. Lee M.W., Won C.K., Lee D.Y., Park G.H., Kim M.S. Stratigraphy and petrology of volcanic rocks in southern Cheju island, Korea // J. Geol. Soc. of Korea. 1994. V. 30, N 6. P. 521–541.
14. Lin P.-N., Stern R.J., Bloower S.H. Shoshonitic volcanism

- in the Northern Mariana arc. 2. Large-ion lithophile and rare earth element abundances: evidence for the source in compatible element enrichments in intraoceanic arcs // *J. Geophys. Res.* 1989. V. 94, N 4. P. 4497–4514.
15. Pallister J.S. Knight R.J. Rare-earth element geochemistry of Samail ophiolites near Ibru, Oman // *J. Geophys. Res.* 1981. V. 86. P. 2673–2697.
 16. Park J.-B., Kwon S.-T. Geochemical evolution of the Cheju volcanic island: Petrography and major element chemistry for stratigraphically-controlled lavas from the northern part of Cheju island // *J. Geol. Soc. of Korea.* 1993. V. 29, N 1. P. 39–60.
 17. Park J.B., Kwon S.T. Geochemical evolution of the Cheju volcanic island (II): Trace element chemistry of volcanic rocks from the northern part of Cheju island // *J. Geol. Soc. of Korea.* 1993. V. 29, N 5. P. 477–492.
 18. Shimazu M., Kawano Y., Kagami H. Major and minor element compositions and Sr, Nd isotope ratios of basaltic rocks from the Pohang-Yangnam area, Korea // *J. Min. Petr. Econ. Geol.* 1990. V. 85, N 9. P. 405–415.
 19. Song S., Lee H.K., Yun H. Petrogenesis of Tertiary volcanic rocks from the southeastern part of Korea // *Tectonic evolution of eastern Asian continent / Ed. Y.I. Lee, J.H. Kim // Geol. Soc. Korea 50th Anniv. Intern. Sympos.* 1997. P. 219–224.
 20. Sun S.S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts // Saunders A.D. and Norry M.J.eds. *Magmatism in ocean basin.* Geological Society, Special Publications. 1989. V. 42. P. 313–345.
 21. Wood D.A. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 1980. V.50, N 1. P.11–30.
 22. Yoon S.H. Miocene-Pleistocene volcanism and tectonics in southern Korea and their relationship to the opening of the Japan sea // *Tectonophysics.* 1997. V. 281, N 1–2. P. 53–70.

Поступила в редакцию 14 августа 2001 г.

Рекомендована к печати Л.П. Карсаковым

P.I. Fedorov, N.I. Filatova, S.I. Dril, K.H. Chang, S.O. Park

Cenozoic volcanism in the southern part of Korea

New data are offered on the strontium chemical and isotopic composition of Miocene (Pohang graben) and Pliocene-Quaternary (Cheju Island) volcanic complexes from the southern part of Korea connected with extension settings. The Early Miocene volcanics of the Yangnam zone are differentiated, from basalts to dacites, and are characterized by increased concentrations of high field-strength elements (HFSE) often exceeding those for E-MORB, by high La_n/Yb_n ratios and a distinct Ta and Nb minimum, and also by the markedly varying values of $^{87}Sr/^{86}Sr=0.7041-0.7048$, and according to data [Shimazu et al., 1990; Song et al., 1997], $^{143}Nd/^{144}Nd=0.512643-0.512843$. The Middle Miocene basalts of the Pohang zone are distinguished by high alkalinity, high concentrations of LILE exceeding those for the oceanic island basalts (OIB) and close to the latter by HFSE contents. $^{87}Sr/^{86}Sr$ values in this group of rocks are close to those for the Early Miocene Pohang volcanics and range between 0.7044 and 0.7045; $^{143}Nd/^{144}Nd$ values vary between 0.512831 and 0.512845 [Shimazu et al., 1990; Song et al., 1997]. The Pliocene-Quaternary volcanics from Cheju Island are represented by alkaline basaltoids with insignificantly developed tholeiites, and also by trachytes. Basaltoids are noted for great enrichment in non-coherent elements, a stable Ta-Nb maximum, REE strong fractionation characterizing them as rocks of the intraplate alkaline series. Tholeiites from Cheju Island marked by LILE and HFSE high concentrations are distinguished by the varying behavior of the Ta-Nb anomaly. Tholeiites, alkaline basalts and trachytes are characterized by the variation interval $^{87}Sr/^{86}Sr=0.7040-0.7044$.

Compositional variations of Cenozoic volcanics from the southern part of the Korea region allow a conclusion on the different nature of magma generating sources. For example, one relates the formation of the Early Miocene tholeiites of the Yangnam zone to mixing of the depleted and subduction components of the sources; the genesis of the Middle Miocene alkaline basalts of the P'ohang zone is determined by an intraplate source close to tholeiites from the Yangnam zone by their isotopic composition; the formation of the Pliocene-Quaternary basalts of Cheju Island is connected with mixing of the depleted and subduction components of the source.