

СЕНОМАНСКИЙ ВУЛКАНИЗМ ВОСТОЧНО-СИХОТЭ-АЛИНСКОГО ВУЛКАНИЧЕСКОГО ПОЯСА (ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ)

© 2003 г. В. П. Симаненко, А. И. Ханчук

Дальневосточный геологический институт Дальневосточного отделения РАН

690022 Владивосток, просп. 100-летия Владивостока, 159;

E-mail: fegi@online.marine.su <http://www.fegi.ru>

Поступила в редакцию 14.12.2001 г.

Проведено геохимическое исследование сеноманских вулканических образований андезит-базальтового состава, залегающих в нижней части Восточно-Сихотэ-Алинского вулканического пояса. Петролого-геохимические особенности этих вулканитов полностью соответствуют продуктам извещково-щелочных магм окраинно-континентальных поясов, формирующихся в надсубдукционной геодинамической обстановке. Выявлены геохимические отличия сеноманских вулканитов от развитых в Сихотэ-Алине апт-альбских островодужных образований и альб-сеноманских пород, характеризующих режим трансформной окраины калифорнийского типа.

В Сихотэ-Алине широко развиты близкие по времени становления среднемиоценовые (апт-альбско-сеноманские) магматические комплексы, сформировавшиеся в различных геодинамических обстановках. Для апт-альбских комплексов, расположенных в прибрежной зоне Сихотэ-Алиня в Кемском террейне, доказывается островодужная природа вулканитов [1, 2]. Магматические комплексы, удаленные к западу от побережья и развитые во внутриконтинентальных впадинах, обладают петрогеохимическими характеристиками магматитов калифорнийской трансформной геодинамической обстановки [3, 4]. Сеноманские андезитовые образования, развитые вдоль побережья Японского моря и проявившиеся вслед за магматитами трансформной континентальной окраины, находятся в составе Восточно-Сихотэ-Алинского вулканического пояса (ВСАВП). До недавнего времени считалось, что окраинно-континентальный пояс непрерывно формировался под действием зоны субдукции с начала позднего мела и до миоцена [5, 6]. Однако исследование Ю.А. Мартынова [7] показали, что кайнозойский магматизм Восточного Сихотэ-Алиня не связан с зоной субдукции. Палеогеновые магматиты, представленные бимодальной серией с преобладанием высокоглиноземистых базальтов, по своим геохимическим характеристикам (повышенные содержания калия, титана, высокие отношения Ni/Co , Ti/V , Ba/La и низкие – La/Nb , La/Ta и др.) близки вулканитам, образующимся в условиях зон растяжения, и хорошо коррелируются с бимодальной серией трансформной окраины Северной Америки. Это позволило вычленить кайнозойские магматические образования из составов ВСАВП и выделить палеогеновую трансформную обстановку в пределах Тихоокеанской окраины

Азии [8]. Более поздние миоцен-плиоценовые магматиты обладают внутриплитной геохимической спецификой и образовались после раскрытия Японского моря [9]. Но и субдукционная природа позднемеловых магматических образований ВСАВП некоторыми исследователями ставится под сомнение. Так, В.П. Уткин главную роль в образовании вулcano-структур Восточно-Сихотэ-Алинского пояса отводит левосторонним сдвигам и связанным с их развитием раздвигам [10], т.е. предполагает рифтовую природу вулканизма ВСАВП.

Решение вопроса о принадлежности магматитов к определенному геодинамическому типу в настоящее время лежит в области геохимии пород. Причем более информативными являются породы основного состава, образовавшиеся из первичных магм, не затронутых процессами дифференциации. Поэтому для определения геодинамической природы ВСАВП нами были исследованы сеноманские вулканиты, залегающие в нижней части пояса и содержащие большие объемы андезитовых и базальтовых магматических продуктов. Геологически эти образования изучены хорошо, но геохимически – слабо. Для большинства из них до сих пор отсутствуют данные по многим микроэлементам и тем более по полному спектру редкоземельных элементов (REE).

Вопросы внутреннего строения, стратиграфии, тектоники, магматизма ВСАВП рассматриваются во многих публикациях [11–14]. Вулканический пояс сложен главным образом кремнекислыми вулканитами, внедрившимися в коньяк-кампанское время. На сеноманском и маастрихском этапах формирования пояса были сформированы значительные объемы андезитовых

магм. Сеноманские магматические комплексы располагаются обычно во внутренней (западной) части ВСАВП, а распространение их ограничено Прибрежным и Восточным разломами [14]. Эти комплексы в разных районах ВСАВП известны под названием синанчинской, базовской, кастофуновской, черемуховской, "толщи андезитов", "андезитовых порфириров", кукуинской, больбинской свит и толщ и сложены главным образом андезитами и их туфами при подчиненной роли базальтов, дацитов и риолитов и их туфов. Во многих районах в сеноманских толщах устанавливается антидромная тенденция развития вулканизма с появлением андезибазальтовых и базальтовых лав в верхних частях свит [13, 15]. С вулканистами во времени и пространстве тесно ассоциируют субвулканические, экструзивные и интрузивные образования, представленные андезитами, андезибазальтами, базальтами, дацитами, диоритами, габбро-диоритами и габбро-диабазам. Результаты калий-аргонового датирования абсолютного возраста пород перечисленных свит по данным разных авторов соответствуют интервалу 110 до 75 млн. лет, с выраженным максимумом на гистограмме распределений возрастов 95–90 млн. лет [13, 14]. Палеофлористические находки в вулканогенно-осадочных отложениях этих свит указывают на преимущественно сеноманский, сеноман-туронский и, реже, позднеальбский возраст.

Нами исследован вещественный состав среднеосновных вулканических пород синанчинской свиты в южной и центральной частях Приморья (рис. 1) в бассейнах рек: 1 – Черной (вблизи села Сокольчи); 2 – Маргаритовки (у села Шербаковки в пределах Синанчинской вулкано-тектонической структуры [11]); 3 – Аввакумовки (кастофуновская свита падей Кастофунова, Грушевой, Петрозевки); 4 – Угловой (синанчинская свита Угловской вулкано-плутонической структуры [16–19]); 5 – Черемуховой (Дальнегорская ВТС [14]) и 6 – Джигитовки (Пластунская ВТС [11, 12, 14]).

Макрокомпоненты в породах определены классическим силикатным анализом в лабораториях ГУ ДВГИ ДВО РАН (аналитики С.П. Славкина и С.П. Баталова); большинство микроэлементов – спектральным количественным методом в спектральной лаборатории ГУ ДВГИ ДВО РАН (аналитики Т.В. Сверкунова и Л.И. Азарова); крупноионные литофильные элементы – рентген-флюоресцентным методом в лаборатории ПГО (аналитик М.В. Войтышина); радиоактивные и редкоземельные элементы в части образцов определены нейтронно-активационным методом в лаборатории ИГФМ АН Украины (аналитик Л.В. Кононенко), а в части – масс-спектральным с индукционно связанной плазмой (IPC-MS) в лаборатории ИГЕМ РАН.

ПЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Петрография. Среди пород андезитового и базальтового состава сеноманских толщ и свит в разных вулкано-тектонических структурах присутствуют как афировые, так и порфировые разновидности с плагиоклазовым, роговообманково-плагиоклазовым, пироксен-плагиоклазовым и пироксен-магнетит-плагиоклазовым парагенезисами вкрапленников. Плагиоклазы обычно представлены зональным андезином. Среди пироксенов преобладает клинопироксен (авгит); ромбический пироксен встречается редко. Цементирующая вкрапленники масса обычно имеет пилотакситовое или микролитовое строение. В большинстве случаев породы подвержены зеленокаменному метасоматозу с развитием серицита по плагиоклазам и хлорита по темноцветным минералам и стеклу основной массы.

Химический и микроэлементный состав вулканистов

По содержанию кремнезема исследованные породы в большинстве случаев отвечают андезитам и андезибазальтам; в меньшем количестве среди них встречаются базальты и дациты (табл. 1, рис. 2). По содержанию щелочей они относятся к породам нормальной щелочности, что отличает их от апт-альбских высококальциевых известково-щелочных и шошонитовых базальтоидов Кемского островодужного террейна [2]. По величине K_2O/Na_2O менее 1 они относятся к калиево-натриевой серии. По соотношениям $FeO^*/MgO - SiO_2$ и $FeO^* - FeO^*/MgO$ большая часть из них принадлежит к известково-щелочной, а меньшая – толеитовой сериям. По соотношению микроэлементов $Zr - Y - Y$ [18] все исследованные породы принадлежат к известково-щелочной серии.

Среди вулканистов преобладают породы с низкими (менее 1 мас. %) содержаниями TiO_2 , а максимальные его концентрации не превышают 1.2 мас. %. Содержания глинозема в 90% анализированных образцов менее 18 мас. %, что позволяет относить их к умеренно-глиноземистому типу, и только 10% образцов соответствует высокоглиноземистому типу ($Al_2O_3 = 18-20$ мас. %). Уровень концентраций MgO в большинстве случаев менее 6 мас. %, но в экструзивных габбро-диабазам и отдельных образцах базальтов пади Кастофунова достигает 7.3 мас. %. Повышенными концентрациями магния, достигающими 8.29 мас. % MgO , характеризуются также базальты Угловской вулкано-тектонической структуры. Содержания суммарного железа в породах варьируют от 5 до 10 мас. %. FeO обычно преобладает над Fe_2O_3 . Величина окислительного потенциала в породах отдельных вулкано-тектонических структур возрастает с увеличением кремнекислотности незначи-

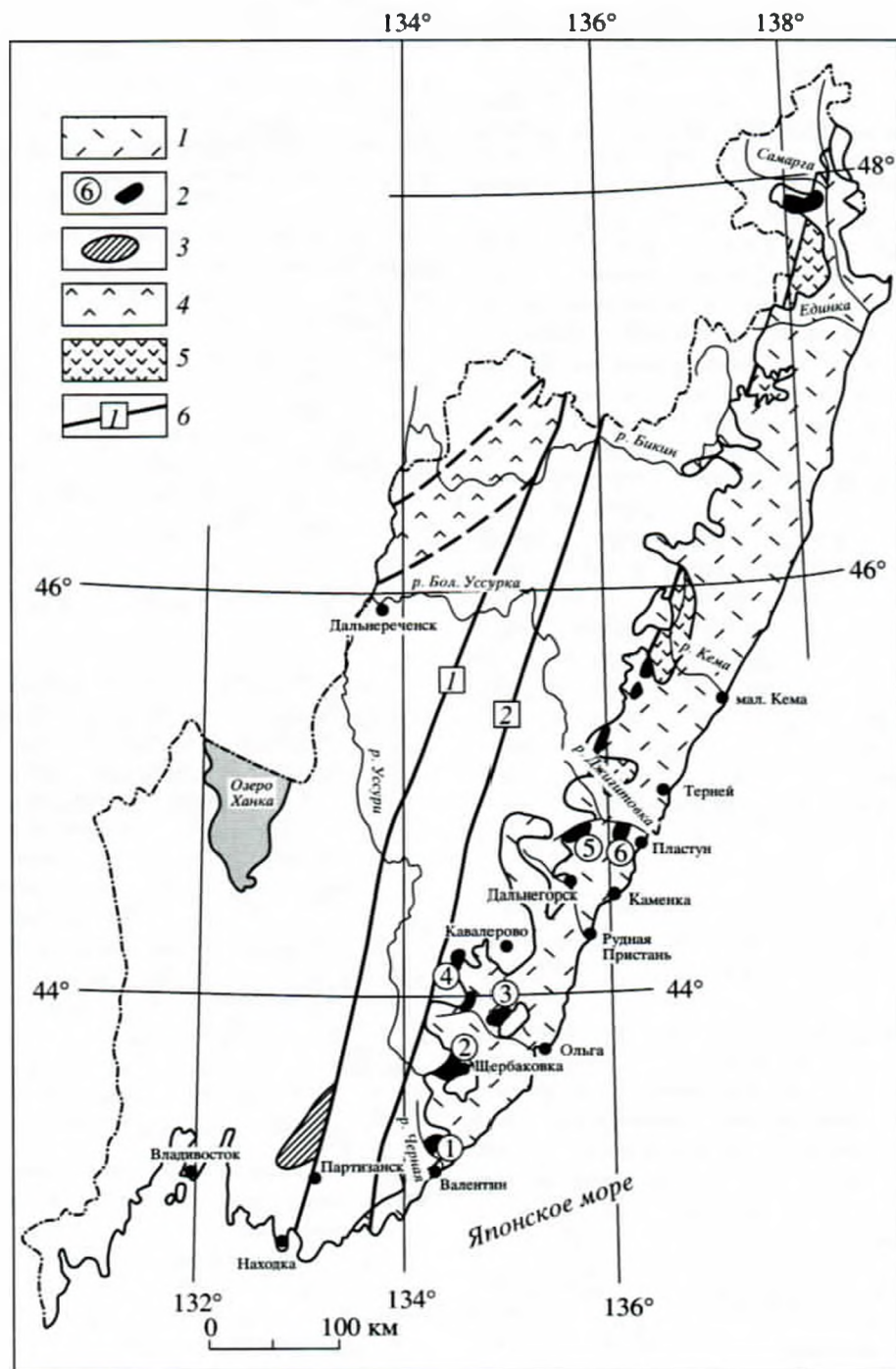


Рис. 1. Схема расположения апт-альб-сеноманских магматических образований на территории Приморья. 1 – Восточно-Сихотэ-Алинский окраинно-континентальный вулканический пояс, 2 – основные участки развития сеноманских вулканитов в пределах Приморской части ВСАВП и районы их исследования: 1 – бассейн р. Черной, 2 – Синанчинская вулкано-тектоническая структура (ВТС), 3 – кастофуновская свита в левобережье р. Аввакумовки (пади Кастофунова, Грушевая, Петрозюевка), 4 – синанчинская свита Угловской ВТС, 5 – Дальнегорской ВТС, 6 – Пластунской ВТС. 3–4 – районы развития вулканитов альб-сеноманской трансформной континентальной окраины калифорнийского типа (3 – Партизанский каменноугольный бассейн, 4 – Алчанский прогиб). 5 – районы развития апт-альбских вулканитов Кемского террейна Монероно-Самаргинской островной дуги, 6 – главные разломы (1 – Арсеньевский, 2 – Центральный Сихотэ-Алинский).

тельно. Концентрации СаО в андезитах обычно составляют 3–6 мас. % и увеличиваются в базальтах до 9–10 мас. %.

Элементы-примеси. Содержания ванадия и хрома, которые изоморфно замещают Fe^{+3} в водосодержащих минералах и магнетитах, в рассма-

Таблица 1. Химический состав сеноманских вулканитов Восточно-Сихотэ-Алинского вулканического пояса

Ком- понент	Номер образца										
	ПТ-2	ПТ-7	ПТ-33	ПТ-35/1	ПТ-36	ПТ-38	Ф-47	ПТ-44	Ф-20	Ф-22	ПТ-51
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SiO ₂	59.54	58.52	49.74	60.63	61.30	63.98	50.68	53.88	55.64	55.62	59.35
TiO ₂	0.83	1.15	1.41	0.97	1.18	0.70	0.82	0.96	1.12	1.21	0.91
Al ₂ O ₃	14.23	16.01	17.38	15.38	15.30	13.78	13.19	16.46	17.42	17.44	15.63
Fe ₂ O ₃	5.31	3.36	5.11	2.27	2.97	1.10	1.99	2.87	5.35	1.67	3.69
FeO	2.36	2.70	4.00	2.88	2.59	2.16	5.78	5.10	3.22	6.86	5.97
MnO	0.07	0.10	0.16	0.09	0.07	0.07	0.17	0.17	0.07	0.18	0.18
MgO	2.04	2.61	2.86	1.98	1.93	1.90	7.34	2.84	1.88	3.72	2.35
CaO	3.33	4.40	9.46	3.83	3.31	4.99	10.20	8.19	6.98	6.31	3.27
Na ₂ O	2.44	3.30	2.26	2.84	3.81	1.31	2.17	2.26	3.46	2.69	2.62
K ₂ O	1.07	2.19	1.43	2.12	1.86	2.27	0.89	0.50	2.30	1.41	0.55
P ₂ O ₅	0.57	0.59	0.66	0.45	0.44	0.23	0.27	0.36	0.37	0.40	0.18
H ₂ O ⁻	1.14	0.20	0.00	0.35	0.15	0.00	0.25	0.20	0.00	0.12	0.00
H ₂ O ⁺	7.01	4.51	7.54	5.71	4.80	7.06	2.88	6.54	1.87	2.13	5.09
Сумма	99.94	99.64	100.65	99.55	99.74	99.55	99.77	100.34	99.68	99.16	99.78
FeO/MgO	3.15	3.55	3.00	2.48	2.72	1.65	1.02	2.70	4.27	2.24	3.95
K ₂ O/Na ₂ O	0.42	0.28	0.46	0.90	0.49	1.73	0.41	0.22	0.66	0.52	0.20
σ	0.73	1.94	2.02	1.39	1.75	0.61	1.21	0.70	2.62	1.33	0.61

Ком- понент	Номер образца									
	Ф-19	ПТ-226	ПТ-228	К-475	268/87	К-475/5	К-475/9	К-488/4	223/87	1
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
SiO ₂	46.20	62.09	60.85	50.60	50.38	51.39	53.49	53.29	50.40	58.50
TiO ₂	0.53	0.64	1.02	1.28	1.22	1.19	1.07	0.97	1.15	0.74
Al ₂ O ₃	20.70	16.78	16.20	17.74	18.73	16.84	18.17	19.38	16.49	16.44
Fe ₂ O ₃	2.97	2.06	4.63	3.90	1.86	3.20	2.49	5.66	3.73	0.91
FeO	4.48	4.17	2.34	4.89	8.29	5.03	4.27	4.97	4.94	5.74
MnO	0.14	0.20	0.11	0.17	0.51	0.19	0.13	0.21	0.18	0.14
MgO	7.37	1.27	1.17	3.59	4.80	3.59	2.13	2.65	7.55	4.61
CaO	12.77	5.80	4.78	7.83	5.30	8.51	7.68	5.18	8.33	5.37
Na ₂ O	1.55	3.11	3.39	2.95	1.41	2.41	2.32	3.21	2.72	2.97
K ₂ O	0.32	1.60	2.71	0.40	1.49	0.27	1.11	2.05	1.11	2.65
P ₂ O ₅	0.20	0.37	0.50	0.70	0.49	0.70	0.51	0.40	0.27	
H ₂ O ⁻	0.28	0.69	1.22	0.00	0.08	0.00	0.00	0.00	0.15	
H ₂ O ⁺	2.04	0.69	0.58	6.04	4.82	6.21	6.34	1.72	2.84	
Сумма	99.77	99.47	99.50	100.04	99.49	99.53	99.71	99.69	99.86	
FeO/MgO	1.62	4.74	5.56	2.34	2.07	2.20	2.10	3.79	1.09	1.47
K ₂ O/Na ₂ O	0.20	0.57	0.89	0.13	1.0	0.11	0.41	0.63	0.40	0.89
σ	1.08	1.16	2.08	1.47	1.13	0.85	1.12	2.68	1.98	2.04

Примечание. 1–2 – андезиты р. Черной; 3 – базальты; 4 – андезиты; 5, 6 – андезито-дациты Синанчинской ВТС; 7–12 – кастофунов-ская свита падер Кастофунова и Петрозюевки (7 – базальты, 8, 9, 10 – андезибазальты, 11 – андезит, 12 – субвулканический габбро-диабаз); 13–14 – андезиты Пластунской ВТС, 15–19 – вулканиты Дальнегорской ВТС (15–17 – базальты, 18, 19 – андезибазальты); 20–21 – вулканиты Угловской ВТС (20 – базальт, 21 – андезит из работы [19]). $\sigma = (K_2O + Na_2O)/SiO_2 - 43$.

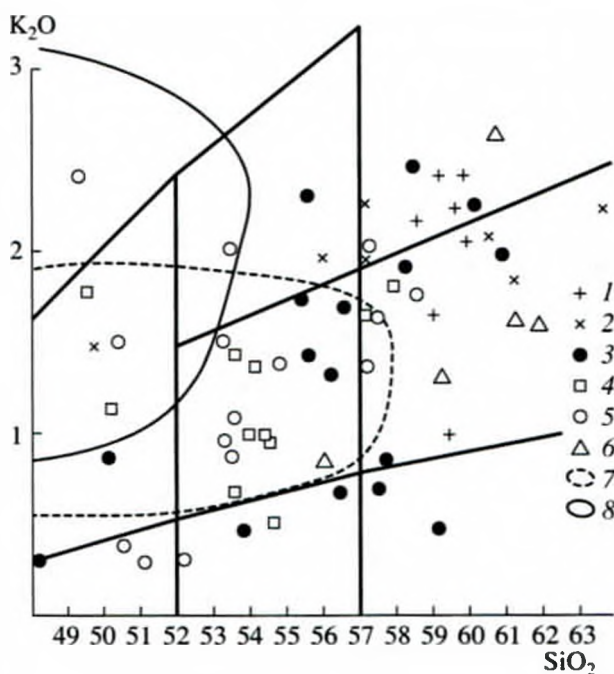


Рис. 2. Положение сеноманских вулканических пород ВСАВП на диаграмме K_2O-SiO_2 . 1 – андезиты р. Черной; 2 – Синанчинской ВТС; 3 – кастофуновской свиты левобережья р. Аввакумовки; 4 – Угловской ВТС; 5 – Дальнегорской ВТС; 6 – Пластунской ВТС; 7 – поле альб-сеноманских вулканических пород Партизанского каменноугольного бассейна Приморья [4]; 8 – поле базальтов Кемского островодужного террейна Приморья [2].

триваемых породах варьируют в пределах одного–двух порядков: от 23 до 320 г/т и от 5 до 770 г/т, соответственно (табл. 2). Во многих вулканотектонических структурах наблюдается отчетливая корреляция этих элементов с кремнекислотностью, выражающаяся в увеличении содержаний V и Cr от андезитов к базальтам при положительной величине V/Cr отношения, варьирующей от 5 до 18. Исключением являются породы Угловской вулканотектонической структуры, в которых при примерно постоянном содержании ванадия (100–200 г/т) содержания хрома составляют 120–770 г/т, а отношение V/Cr < 1. В этих породах проявляется тенденция увеличения содержаний хрома с увеличением магнезиальности пород. Содержания ванадия в породах коррелируются с содержанием в них FeO^* .

Содержания никеля и кобальта, изоморфно замещающих Fe^{+2} и Mg в оливинах и пироксенах, в большинстве вулканотектонических структур варьируют от 3 до 58 г/т, а отношение Ni/Co, являющееся показателем глубинности пород [20], находится в пределах от 0.3 до 2. Повышенными концентрациями никеля (49–260 г/т) обладают вулканические породы Угловской вулканотектонической структуры. Для них же характерны повышенные

содержания кобальта (13–32 г/т) и высокое Ni/Co отношение (около 4).

По содержанию рубидия описываемые породы не отличаются от андезитов известково-щелочной серии островных дуг и активных континентальных окраин. Содержания рубидия колеблются (в г/т): в андезитах от 13 до 72, в андезибазальтах от 12 до 108, в базальтах от 10 до 47, т.е. незначительно увеличиваются с возрастанием кремнекислотности и калиевого содержания пород. Величина K/Rb отношения так же возрастает от базальтов (79–132) до андезитов (73–908).

Аналогично рубидию ведет себя и барий. В базальтах его содержания варьируют от 280 до 775 г/т, в андезибазальтах – от 226 до 883 г/т, в андезитах – от 350 до 1847 г/т. Наибольшими концентрациями бария (1400–1847 г/т) обладают андезиты бассейна р. Черной. Для них же характерны и низкие значения величин Rb/Ba отношений (2.7–6.4), хотя в андезитах других вулканотектонических структур это отношение варьирует в пределах 10.9–24.5 и снижается в базальтах до 3.7–16.3.

Распределение Sr в сеноманских вулканических породах согласуется с содержанием Ca и противоположно Ba: его количество убывает от базальтов (362–988 г/т) к андезибазальтам (241–554 г/т) и андезитам (374–747 г/т). В то же время с ростом кремнекислотности пород наблюдается некоторый рост Sr относительно Ca, поскольку величина Ca/Sr отношения немного снижается от базальтов (68–164), к андезибазальтам (85–136) и андезитам (20–131). В соответствии с этим значения Ba/Sr отношения увеличиваются от базальтов (0.42–0.99) к андезибазальтам (0.31–1.88) и андезитам (0.55–3.72).

Содержания высокочarged элементов (Nb, Zr, Ta, Hf) в образцах сеноманских комплексов Сихотэ-Алиня заметно варьируют, но находятся на одинаково низком уровне во всех типах пород и не проявляют какой-либо определенной зависимости от кремнекислотности, щелочности или магнезиальности пород. Так, содержания Nb составляют 8–21 г/т, Zr – 77–240 г/т, Ta – 0.18–1.2 г/т, Hf – 0.39–5.68 г/т.

Содержания радиоактивных элементов урана и тория в исследованных породах колеблются от 0.72 до 1.86 г/т и от 2.7 до 13.5 г/т соответственно. Более высокие концентрации этих элементов присущи лейкократовым и глиноземистым породам по сравнению с меланократовыми и магнезиальными разновидностями. Отношение Th/U подчиняется единому тренду для всей совокупности пород и находится в узком интервале значений от 2.7 до 4.8, а отношение K/U изменяется от 0.9 до 6.3×10^4 , что характерно для континентального и островодужного типов базальтов японского региона [21].

Таблица 2. Микроэлементный состав (в г/т) сеноманских вулканитов Восточно-Сихотэ-Алинского вулканического пояса

Элемент	ПТ-2*	ПТ-7*	ПТ-33	ПТ-35/1*	ПТ-36*	ПТ-38*	Ф-47	ПТ-44	Ф-20	Ф-22	ПТ-51*
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Ni	25	8	35	11	16	10	76	12	16	10	23
Co	18	8.7	16	9.5	12	7.4	33	20	15	23	15
Cr	7.5	7.8	45	5.0	14	7.2	250	29	32	14	22
V	85	70	215	39	55	23	182	163	159	200	270
Cu	40	18	41	40	37	23	44	18	7.2	21	3.5
Pb	5.8	3.0	12	5.0	5.8	4.7	5.7	7.5	9.3	11	2.2
Zn	83	36	110	73	73	33	81	8.2	6.6	218	50
Sn	1.8	0.9	2.0	0.8	0.9	1.0	0.7	1.9	1.4	1.0	1.2
Zr	119	126	174	156	140	135	144	144	146	144	127
Rb	49	36	47.2	29	15	61	17.5	16	42.8	40.3	31
Sr	418	645	958	468	558	401	522	435	468	522	394
Y	46	10	30.5	—	—	—	24	26.2	26.9	28.2	—
Nb	12	8.0	20.9	14	17	8	11.8	16.0	11.9	11.8	8
Ba	1556	1420	775	430	314	734	550	431	883	4.83	348
Hf	25	4.8	4.3	0.71	1.7	3.1	2.97	3.86	3.84	3.75	0.39
Ta	—	1.2	0.97	—	1.0	1.25	0.50	0.73	0.53	0.72	—
Th	5.2	1.3	6.6	6.9	12	7.25	4.23	6.44	5.72	5.56	4.1
U			1.56				0.98	1.72	1.50	1.37	
La	59.7	32.9	33.2	37.6	33.7	28.1	16.95	22.88	26.7	21.5	18.8
Ce	95.2	51.0	70.4	50.1	59.6	54.5	33.45	47.58	52.0	44.3	44.9
Pr			8.6				4.19	5.51	5.77	5.53	10
Nd	53	47	34	23	25	37	17.78	23	22.4	22.2	2.89
Sm	14.8	4.89	6.9	3.92	6.06	4.07	3.90	4.89	4.58	4.60	1.0
Eu	3.49	1.45	2.0	1.06	1.36	1.23	1.28	1.35	1.50	1.50	
Gd			6.5				4.12	4.49	4.38	4.53	
Tb	1.59	0.61	0.95	—	0.91	—	0.63	0.71	0.66	0.67	0.61
Dy			5.1				3.71	4.33	4.02	4.32	
Ho			1.67				0.84	0.89	0.93	0.94	
Er			2.63				1.98	2.33	2.28	2.40	
Tm			0.38				0.32	0.35	0.36	0.36	
Yb	4.69	3.55	2.46	1.23	2.16	2.32	1.95	2.28	2.40	2.10	1.87
Lu	0.77	0.53	3.0	0.16	0.27	0.37	0.29	0.34	0.33	0.34	0.38
ΣREE			175.9				91.4	120.9	128.3	114.3	
Eu/Eu*			0.89				0.97	0.86	1.00	0.99	
K _{REE}			3.52				3.09	3.00	3.05	3.23	

Таблица 2. Окончание

Элемент	Ф-19	ПТ-226*	ПТ-228*	К-475	268/87	К-475/5	К-475/9	К-488/4	223/87	1
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Ni	58	12	6.8	13	17	11	6.9	9.7	226	21
Co	33	20	11	21	22	20	18	18	36	
Cr	199	12	8.5	26	50	26	9.2	9.2	532	
V	141	310	100	220	233	218	166	166	202	
Cu	7.5	110	1.0	15	7	15	6.3	11	33	
Pb	7.8	40	28	9.7	10	14	11.3	13.7	3.54	0.9
Zn	51	160	100	98	108	112	113	132	74	
Sn	0.6	1.8	2.2	2.8	5.3	2.8	3.1	8.0	2.1	
Zr	77	123	239	182	134	170	209	219	126	121
Rb	10	10	36	11.2	78.6	10.9	55.5	146	31.4	102
Sr	616	493	396	725	284	671	483	449	362	292
Y	8.2	14	22	29.2	30.9	31.3	34	40.5	25.5	22.3
Nb	2.1	15	16	15.7	12.8	17.0	20.4	18.9	10.5	7.0
Ba	94	136	696	310	451	321	468	366	281	450
Hf	1.85	2.2	4.1	4.36	3.65	4.34	4.99	5.68	2.96	3.87
Ta	0.18	—	1.1	1.07	0.68	0.71	0.92	1.24	0.50	
Th	1.31	5.5	10.7	5.46	4.36	5.97	8.80	13.5	3.70	19.3
U	0.48			1.22	0.99	1.24	1.82	1.86	0.77	4.95
La	4.99	14.1	34.9	25.0	17.4	27.8	34.1	27.8	14.6	30.2
Ce	11.2	33	72.5	56.7	39.0	61.6	72	62.4	33.2	62.6
Pr	1.32			6.81	4.91	7.32	8.22	7.82	4.12	7.16
Nd	5.53	20	40	28.1	21.3	29.3	33.6	32.4	17.3	24.8
Sm	1.15	3.28	7.38	5.94	4.82	6.48	6.22	7.31	4.03	4.95
Eu	0.51	1.23	1.61	1.58	1.31	1.62	1.72	1.89	1.16	0.98
Gd	1.27			5.36	4.97	5.82	6.15	7.49	4.15	4.43
Tb	0.18	0.83	0.87	0.82	0.79	0.87	0.91	1.08	0.60	0.67
Dy	1.22			4.84	4.85	5.35	5.13	6.78	4.02	3.97
Ho	0.29			1.08	1.14	1.15	1.17	1.45	0.96	0.81
Er	0.69			2.66	2.83	2.76	2.82	3.83	2.22	2.34
Tm	0.11			0.39	0.44	0.42	0.42	0.62	0.38	0.36
Yb	0.72	2.42	4.03	2.51	2.82	2.58	2.71	3.63	2.40	2.29
Lu	0.12	0.55	0.62	0.36	0.40	0.35	0.39	0.52	0.30	0.35
ΣREE	29.3			142.1	107.0	153.4	175.5	165.0	89.44	149.0
Eu/Eu*	1.28			0.84	0.81	0.79	0.84	0.77	0.86	0.62
K _{REE}	2.44			3.21	2.75	3.44	3.33	2.84	2.98	3.00

* В образцах, отмеченных звездочкой, REE, Th, Hf, Ta – определены нейтронно-активационным методом; в остальных – масс-спектральным с индукционно связанной плазмой (ICP-MS).

Редкоземельные элементы. Концентрация редкоземельных элементов в породах достаточно высока и поддерживается главным образом за счет легких лантаноидов. При этом вариации между разными по кремнекислотности вулканами незначительные, но уровень содержаний

легких REE в андезитах и дацитах немного выше, а тяжелых – ниже, чем в базальтах. Сумма REE плюс иттрий в отдельных образцах эффузивов изменяется от 115 до 210 г/т. В субвулканических габбро-диабазх пади Кастофунова эта величина самая низкая (37.5 г/т). Величина коэффициента

редкоземельности [$K_{\text{REE}} = 0.1\text{La/Yb} + \text{Ho/Yb} + (\text{Dy} + \text{Ho})/(\text{Yb} + \text{Lu})$] (исходные данные нормированы к хондриту), предложенная Ю.П. Трошиным [22], находится в узком интервале значений (от 2.7 до 3.5) для всех типов пород. Нормированные концентрации REE (рис. 3) описываются кривыми, близкими для пород известково-щелочной и шонит-латитовой серий [27] и закономерно уменьшаются с увеличением порядкового номера элемента. Спектры лантаноидов характеризуются умеренным наклоном графиков без отчетливого перегиба в средней части и выраженного европиевого минимума с постепенным выполаживанием в области тяжелых элементов от тербия до лютеция. Величина Eu/Eu^* отношения в вулканических породах разных ВТС варьирует от 0.77 до 1, а в субвулканических породах составляет 1.25. Отношение $(\text{La}/\text{Sm})_n$, характеризующее наклон спектра REE в области легких лантаноидов, изменяется от 2–3.6 в базальтах и андезибазальтах до 3.4–6 в андезитах. Отношение $(\text{Ce}/\text{Yb})_n$ варьирует от 3.5 до 10.4 и в целом выше в андезитах, чем в базальтах.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Вулканические породы сеноманского возраста из различных вулканотектонических структур Восточно-Сихотэ-Алинского пояса обнаруживают близость в распределении петрогенных компонентов и микроэлементов. Из общей совокупности пород по составу выделяются лишь вулканы Угловской ВТС, характеризующиеся повышенной магнезиальностью и более высокими концентрациями феррических компонентов, и субвулканические габбро-диабазы пади Кастофунова, обладающие низкими концентрациями редкоземельных элементов. Однако во всех исследованных породах отношения некогерентных элементов Ce/La , Zr/La , Nb/La , Th/La , Yb/La близки к постоянным величинам и хорошо коррелируются между собой. Обычно это свойственно комагматическим образованиям, а в данном случае свидетельствует о принадлежности пород различных ВТС к единой магматической серии.

Традиционно ВСАВП рассматриваются как активная континентальная окраина андийского типа [5, 6]. Приведенные данные по геохимии сеноманских вулканических пород убедительно подтверждают эти представления. Сравнение исследованных пород с близкими им по кремнекислотности и щелочности породами различных геодинамических обстановок указывает на близость их к надсубдукционным образованиям. На различных диаграммах, использующих такие бинарные и треугольные соотношения элементов для выявления геодинамической принадлежности пород, как $\text{TiO}_2\text{--Zr}$, $\text{Ti}/100\text{--Zr--Sr}/3$, $\text{Ti--Zr--Y} \times 3$, $\text{Rb} - (\text{Y} + \text{Nb})$

[18], $\text{La}/10\text{--Y}/15\text{--Nb}/8$ [28], Ti--V [29], $\text{Th--Hf}/3\text{--Ta}$ [30], а также на дискриминантных диаграммах Дж. Пирса [31] сеноманские вулканические породы располагаются в полях активных континентальных окраин и островных дуг (рис. 4). По такому показательному отношению, как $\text{La}/\text{Yb--K}_2\text{O}$ [32], сеноманские породы в большинстве случаев располагаются в поле толеитовых, высокоглиноземистых и известково-щелочных лав островных дуг и близки базальтам Большого Толбачинского извержения на Камчатке. Лишь небольшая часть образцов смещается в поле щелочных пород (рис. 5). Показательны также величины некоторых отношений микроэлементов. Так, величина La/Ta отношения в породах находится в пределах 22.4–50.4, что свойственно вулканическим активным континентальным окраинам. Низкие значения этого отношения (< 20) обычно для континентальных и океанических внутриплитных обстановок. По отношениям La/Ba (от 11 до 80), La/Th (от 2 до 7), La/Nb (от 1 до 5) все они соответствуют орогенным андезитам. Показательно также La/Yb отношение, которое варьирует в сеноманских вулканических породах от 6 до 30 и обычно > 10 , что выше, чем в островных дугах ($\text{La}/\text{Yb} = 1\text{--}10$) и типично для окраинно-континентальных поясов. На диаграмме (рис. 3) отчетливо видна обогащенность сеноманских вулканических пород относительно магматических образований среднего типа островных дуг легкими лантаноидами и близость их к вулканическим Андийского и Охотско-Чукотского окраинно-континентальных поясов. Спайдер-диаграммы (рис. 6) также отображают принадлежность пород к окраинно-континентальному типу. Отчетливо проявлены положительные аномалии по калию, рубидию, барию, торию, церию и отрицательные – по танталу, ниобию, цирконию, гафнию и титану. При близких содержаниях REE с вулканическими породами апт-альбского возраста Кемского террейна Монероно-Самаргинской островной дуги, сеноманские вулканические породы отличаются отсутствием явно выраженного европиевого минимума (рис. 3). От альб-сеноманских вулканических пород коркинской серии и даданшаньской свиты Партизанской каменноугольной бассейна Приморья, формировавшихся в геодинамических условиях трансформной континентальной окраины калифорнийского типа, для которых характерен сигмоидальный рисунок графиков распределения нормированных содержаний REE [4], сеноманские вулканические породы отличаются прямолинейными графиками распределения REE.

Макро- и микрокомпоненты, в особенности редкоземельные элементы, обычно используются для выяснения условий магмообразования и выявления минерального состава субстрата, в результате частичного плавления которого образуются первичные магмы. Считается, что известково-

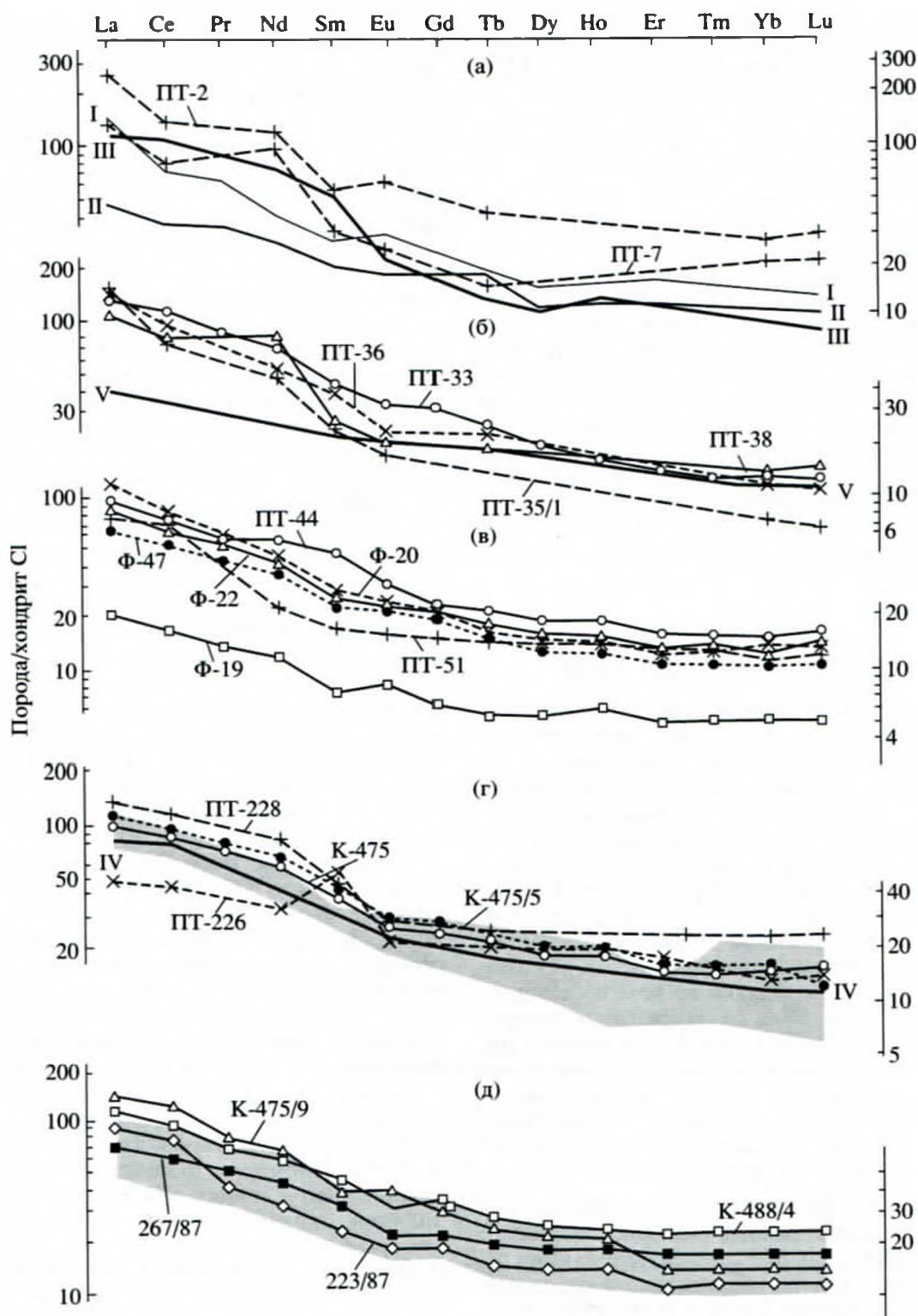


Рис. 3. Распределение нормализованных к хондриту концентраций REE в сеноманских вулканитах ВСАВП. а – бассейны р. Черной; б – Синанчинской ВТС; в – кастофуновской свиты; г, д – Дальнегорской, Пластунской и Угловской ВТС. Тренды пород типовых структур: I–I – андезиты Омогонского массива ОЧВП [23]; II–II – средний тип андезитов островных дуг; III–III – базальты Северной зоны Андийского вулканического пояса [24]; IV–IV – андезитобазальты Южной зоны Андийского вулканического пояса [25]; V–V – андезитобазальты Высоких Каскад [26]. Заштрихованные поля: на (г) – альб-сеноманских вулканитов Партизанского каменноугольного бассейна Приморья, на (д) – аптальбских вулканитов Кемского островодужного террейна.

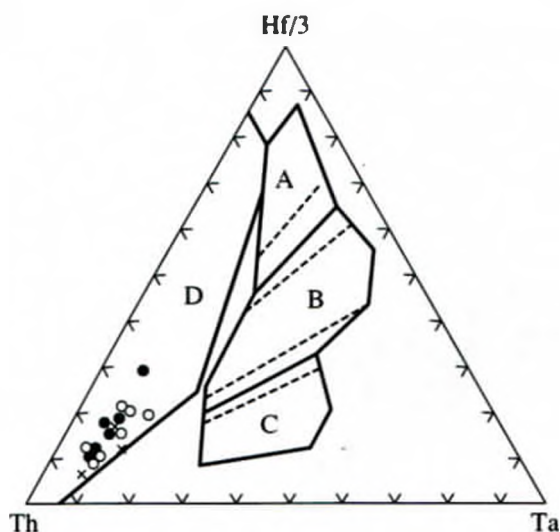


Рис. 4. Диаграмма Th–Hf/3–Ta [30] для сеноманских вулканитов ВСАВП. Условные обозначения см. на рис. 2. Поля базальтов на диаграмме: А–N – тип MORB. В–Е – тип MORB и внутриплитных базальтов, С – щелочных внутриплитных базальтов, D – базальтов островных дуг и активных континентальных окраин.

во-щелочные магмы островных дуг и континентальных окраин образуются в зонах Беньоффа за счет плавления амфиболитовых и, в меньшей мере, эклогитовых субстратов на глубинах до 70 км [33]. По мнению ряда исследователей, высокие содержания калия и некогерентных элементов, высокие K/Na отношения являются показателями большей глубины зарождения магм при незначительной степени плавления мантийных субстратов. Первичные мантийные магмы также характеризуются высоким (от 2.2 до 7.6) Ni/Co отношением [20].

За исключением пород Угловской ВТС для большинства сеноманских вулканитов ВСАВП характерно коровое Ni/Co отношение. Соотношение Rb–Sr (рис. 7) указывает на глубины формирования сеноманских магм Сихотэ-Алиня порядка 20–35 км, что соответствует нижнекоровому уровню и типично для вулканитов активных континентальных окраин. Вулканиты Угловской ВТС, обладающие повышенной магнезиальностью, высокими концентрациями фемафильных элементов и мантийным отношением Ni/Co, могут считаться наиболее глубинными из изученных магматических образований. Большая глубина их образования, видимо, обусловлена пространственным положением Угловской ВТС, занимающей в структуре ВСАВП крайнее западное положение (рис. 1), наиболее удаленное от побережья, а следовательно, и от палеозоны Беньоффа.



Рис. 5. Диаграмма La/Yb–K₂O [32] сеноманских вулканитов ВСАВП. I – тренд щелочных базальтов, II – тренд толентовых, высокоглиноземистых и известково-щелочных базальтов. Точки составов см. на рис. 2.

Из диаграммы (Ce/Yb)_n–Ce_n (рис. 8) видно, что сеноманские магмы образовались путем высокой степени плавления амфиболитового субстрата континентальной коры. На присутствие в составе исходного субстрата преимущественно амфибола и относительно малоглубинные условия магмообразования указывают и низкие величины K_{REE} в породах. В случае присутствия в плавящихся фазах пироксена – K_{REE} обычно около 5, а в присутствии граната – более 7 [22]. На примере вулканитов Угловской и Дальнегорской ВТС видно, что базальты попадают в области с большей, а андезиты – меньшей степени частичного плавления (рис. 8). Следовательно, они могут рассматриваться как первичные. Геохимически это подтверждается отсутствием в сеноманских вулканитах европейских аномалий, являющихся одним из критериев первичности магм [32], а геологически выражается в антидромной последовательности магматических извержений. В результате ранней фракционной кристаллизации первичных магм с отсадкой главным образом темноцветных породообразующих минералов и магнетита при участии плагиоклазов происходит обеднение остаточных жидкостей микроэлементами с появлением слабой отрицательной или положительной Eu/Eu* аномалии [32]. Обедненность субвулканических габбро-диабазов пади Кастофунова всеми микроэлементами, при сохранении общего рисун-

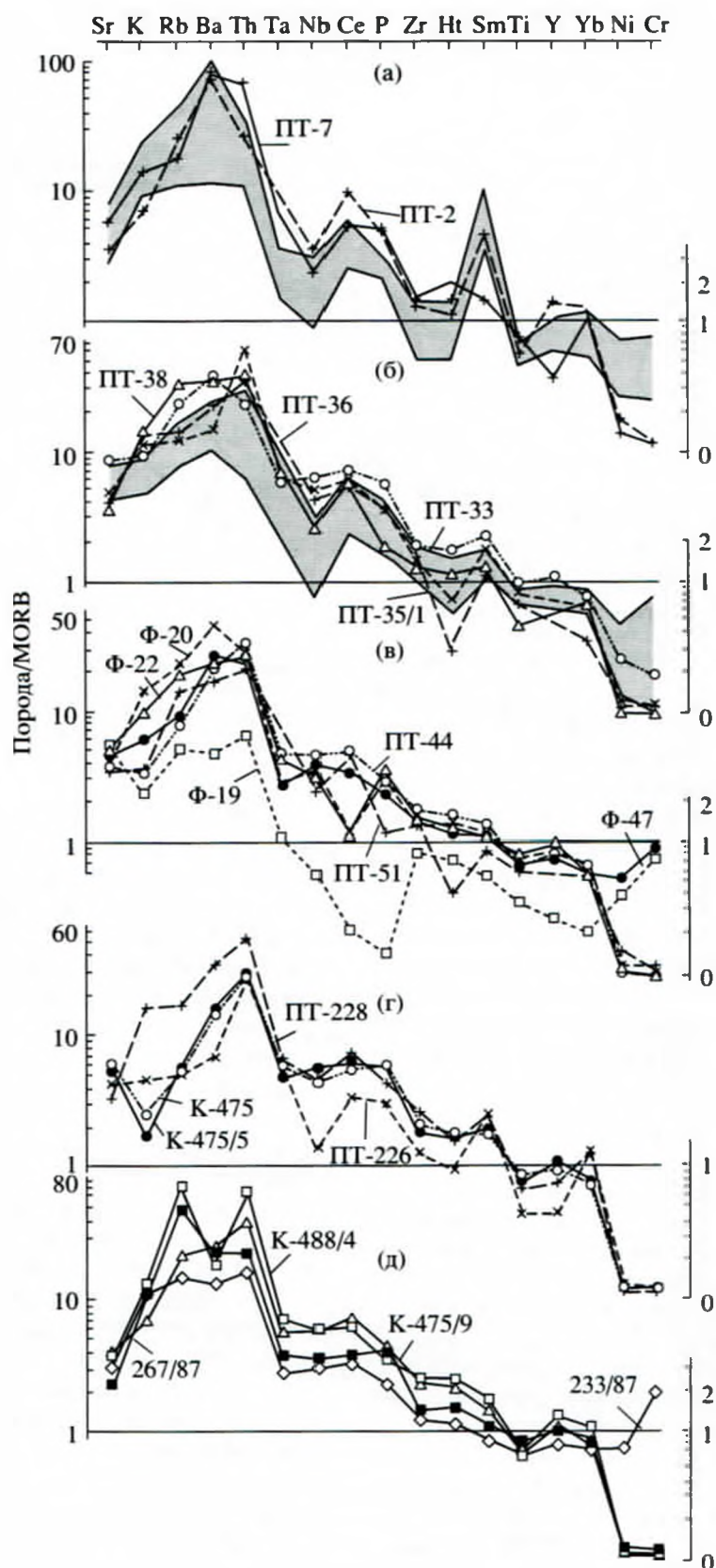


Рис. 6. Спайдер-диаграммы сенонских вулканитов ВСАВП. Условные обозначения такие же, как и на рис. 3. Заштрихованные поля: на (а) – базальтов Кемского островодужного террейна, на (б) – альб-сенонских вулканитов Партизанского каменноугольного бассейна.

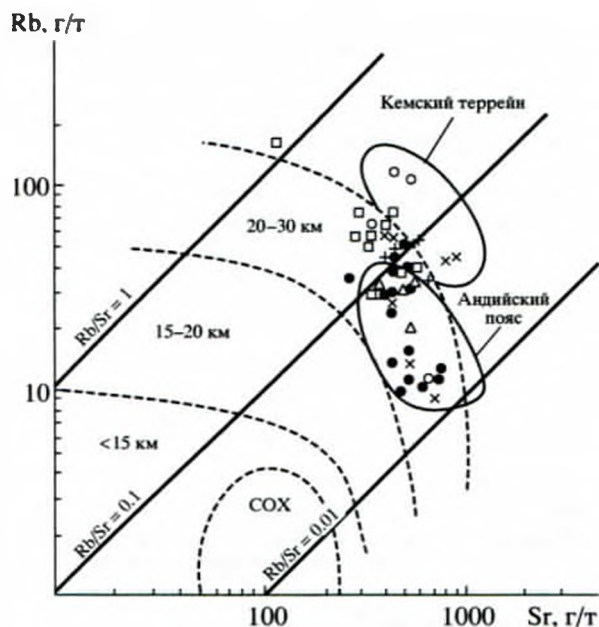


Рис. 7. Диаграмма Rb-Sr [34] для сеноманских вулканитов ВСАВП. Точки составов см. на рис. 3. COX – поле базальтов срединно-океанических хребтов.

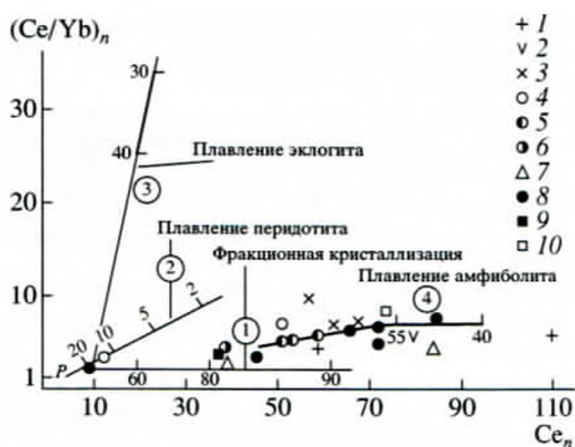


Рис. 8. Диаграмма $(\text{Ce}/\text{Yb})_n$ - Ce_n [35] для сеноманских вулканитов ВСАВП. Точки составов: 1 – андезиты р. Черной, 2 – базальты, 3 – андезиты Синачинской ВТС, 4 – андезиты, 5 – андезито-базальты, 6 – базальты пиди Кастофунова, 7 – андезиты Пластунской ВТС, 8 – базальты и андезито-базальты Дальнегорской ВТС, 9 – базальты, 10 – андезиты Угловской ВТС.

ка распределения REE, очевидно, является примером такой дифференциации.

ВЫВОДЫ

1. Сеноманские вулканические породы из разных вулcano-тектонических структур Восточно-Сихотэ-Алинского вулканического пояса обладают близкими петрогеохимическими чертами, близким уровнем накопления REE и по своим характеристикам соответствуют надсубдукционным вулканитам известково-щелочных серий активных континентальных окраин андийского типа.

2. Судя по антидромной последовательности извержений, накоплению REE, отсутствию европиевого минимума, исследованные породы являются продуктами первичных нижнекоровых-верхнемантийных магм, образованных путем частичного плавления амфиболитового субстрата.

3. Обладая близкой концентрацией REE с аптальбскими островодужными и альб-сеноманскими породами трансформной континентальной окраины калифорнийского типа, сеноманские вулканиты отличаются от первых отсутствием выраженного европиевого минимума, а от вторых – “рисунком” распределения REE.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проекты № 98-05-65343 и № 99-05-64727).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Симаенко В.П. Позднемезозойские вулканические дуги Восточного Сихотэ-Алия и Сахалина // Тихоокеанская геология. 1986. № 1. С. 7–13.
2. Симаенко В.П. Базальт-андезитовые ассоциации островных дуг палеозоя и мезозоя // Тихоокеанская окраина Азии. Магматизм. Под ред. А.Д. Щеглова. М.: Наука, 1991. С. 58–72.
3. Ханчук А.И. Палеогеодинамический анализ формирования рудных месторождений Дальнего Востока России // Рудные месторождения континентальных окраин. Владивосток: Дальнаука, 2000. С. 5–34.
4. Симаенко В.П., Ханчук А.И., Голозубов В.В. Первые данные по геохимии альб-сеноманского вулканизма Южного Приморья // Геохимия. 2002. № 1. С. 95–99.
5. Вулканические пояса Востока Азии. Геология и металлогения. М.: Наука, 1984. 504 с.
6. Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Натанов Л.М. Тектоника литосферных плит территории СССР. Т. 2. М.: Недра, 1990. 327 с.
7. Мартынов Ю.А. Геохимия базальтов активных континентальных окраин и зрелых островных дуг на примере северо-западной Пацифики. Владивосток: Дальнаука, 1999. 217 с.
8. Ханчук А.И., Голозубов В.В., Мартынов Ю.А., Симаенко В.П. Раннемеловая и палеогеновая трансформные окраины (калифорнийский тип) // Тектоника Азии. М.: Геос. 1997. С. 58–79.
9. Мартынов Ю.А., Левашов Г.Б. Геохимические критерии рифтогенной природы плиоцен-плейстоценовых базальтов Восточного Сихотэ-Алия // Докл. АН СССР. 1988. Т. 303. № 2. С. 472–476.
10. Уткин В.П. Горст-аккреционные системы, рифто-грабены и вулcano-плутонические пояса: струк-

- турно-вещественные характеристики и закономерности формирования // Тихоокеанская геология. 1997. Т. 16. № 6. С. 58–79.
11. *Фремд Г.М.* Орогенный вулканизм Южно-Джунгарского и Восточно-Сихотэ-Алинского поясов. Томск: Изд-во Томского университета, 1972. 476 с.
 12. *Ветренников В.В.* Особенности вулканизма, тектоники и оруденения окраинно-материковых вулканических поясов. М.: Недра, 1976. 156 с.
 13. *Федчин Ф.Г., Симаненко В.П., Залевский С.Н. и др.* Геохимия Восточно-Сихотэ-Алинского и Охотского поясов. М.: Наука, 1981. 187 с.
 14. *Михайлов В.А.* Магматизм вулканотектонических структур южной части Восточно-Сихотэ-Алинского пояса. Владивосток, 1989. 172 с.
 15. *Финашин В.К.* Оловорудные месторождения Приморья. Владивосток. 1986. 175 с.
 16. *Матюнин А.П.* Магматизм Кавалеровского и Верхне-Арминского оловорудных районов. Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Владивосток, ДВГИ, 1988. 26 с.
 17. *Поповиченко В.В.* Эволюция магматизма Кавалеровского рудного района. Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Владивосток: ДВГИ, 1992. 31 с.
 18. *Pearce J.A., Cann J.R.* Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1973. V. 19. № 2. P. 290–300.
 19. *Гоневчук В.Г.* Оловоносные системы Дальнего Востока: магматизм и рудогенез. Автореф. ... дис. док. геол.-мин. наук. Владивосток: ДВГИ, 1999. 62 с.
 20. *Козарко Л.И.* Отношение Ni/Co – индикатор мантийного происхождения магм // *Геохимия*. 1978. С. 1293–1321.
 21. *Житков А.С., Коновалов Ю.И., Евланов Ю.Б.* Уран и торий как индикаторы континентального типа базальтового вулканизма Японского моря // *Океанология*. 1985. Т. 25. № 3. С. 471–476.
 22. *Трошин Ю.П., Гребенищикова В.И., Бойко С.М.* Геохимия и петрология редкоземельных плюмазитовых гранитов. Новосибирск: Наука, 1983. 183 с.
 23. *Захаров М.Н., Конусова В.В., Смирнова Е.В.* Редкие земли в базальтоидах Омолонского района // *Геология и геофизика*. 1984. № 4. С. 62–70.
 24. *Andean magmatism: chemical and isotopic constraints* // Eds. E.S. Harmon and B.A. Barreiro. Nartwich: Shiva Publ., 1984. 250 p.
 25. *Hickey V.R., Roa H.M., Lopes-Escobar L., Frey F.A.* Geochemical variation in Andean basaltic and silicic lavas from Villarica-Latin volcanic chain (39.5°S): an evolution of source heterogeneity, fractional crystallization and crustal assimilation // *Contribs Mineral. Petrol.*, 1989. V. 103. P. 161–186.
 26. *Grove T.L., Gerlach D.C., Sando T.W.* Origin of calc-alkaline series lavas at Medicine Lake volcano by fractionation, assimilation and mixing // *Contribs Mineral. and Petrol.* 1982. V. 80. P. 160–182.
 27. Магматические горные породы (основные породы). М.: Наука, 1985. 486 с.
 28. *Cabanis B., Lecolle M.* Le diagramme La/10–Y/15–Nb/8 un outil pour la discrimination des series volcaniques et la mise en evidence des processus de melange et / ou de contamination crustale // *C.R. Acad. Sci. Ser. II*. 309. P. 2023–2029.
 29. *Shervais J.W.* Ti–V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitic lavas // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1982. V. 59. P. 101–118.
 30. *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 Planet. Sci. Lett.*, 1980. V. 50. P. 11–30.
 31. *Pearce J.A.* Statistical analysis of major element patterns in basalts // *J. Petrol.*, 1976. V. 17. P. 15–43.
 32. *Балашов Ю.А.* Геохимия редкоземельных элементов. М.: Наука, 1976. 267 с.
 33. *Рингвуд А.Е.* Состав и петрология мантии Земли. М.: Недра, 1981. 584 с.
 34. *Condie K.C., Baragar W.R.* Rare-Earth element distributions in volcanic rocks from Archean greenstone belts // *Contribs Mineral. and Petrol.* 1974. V. 45. P. 237–246.
 35. *Gill J.B.* Orogenic andesites and plate tectonic. New York, 1981. 390 p.