

З.В. Красножина

Центр проблем морской геологии, геоэкологии
и осадочного рудообразования НАН Украины, Киев

ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ КАРАДАГСКОЙ ГРУППЫ ВУЛКАНОВ

Петролого-изотопно-геохимические исследования вулканических пород Крымской палеоостровной дуги (в наземной части и в акватории Черного моря), в том числе, данные Nd-Sr изотопии в совокупности с установленными информативными соотношениями TR и REE элементов — индикаторов геотектонической позиции позволяют рассматривать продукты вулканизма дуги, как реликты разновозрастных фрагментов островных дуг Палео-Нео-Тетиса, совмещенных в процессе Альпийского орогенеза, в том числе, идентифицированные нами проявления «back-arc» вулканизма Палео-Тетиса в составе вулканитов Карадагской группы вулканов. Совокупность полученной информации, включая соотношения TR, REE элементов-индикаторов геотектонической позиции позволяет идентифицировать базальты нижней серии первого этапа вулканизма Карадага, как продукты «back-arc» задугового вулканизма, либо остаточной дуги Палео-Тетиса ($196 \div 4$ млн, K/Ar), характеристики источника магмы которого сопоставимы с источником базальтов MORB, в их числе: Nb/Yb — 5, Ba/Yb — 12; $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ — 0,5128; $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ — 0,7039). Вулканические породы последующих стадий извержений с большой долей вероятности, являются продуктами разноглубинных деплетированных магматических источников последовательных стадий эволюции островодужной системы Мезо-Тетиса с разномасштабным вкладом субдукционной составляющей (трахилипариты второго этапа — $150 \div 5$ млн лет, (K/Ar), Nb/Yb — 0,8, Ba/Yb — 98; $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ — 0,5126; $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ — 0,7094; кайнозойские дациты третьего этапа ($74 \div 16$ млн лет, K/Ar); Nb/Yb — 1,15; $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ — 0,5127, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ — 0,7049, Ba/Yb — 60,9. Породы всех этапов вулканизма относятся преимущественно к толеитовой серии дифференциации, андезит-дациты, риолиты заключительных стадий второго этапа к известково-щелочной серии. Изотопно-минералого-геохимические характеристики вулканических пород центральной части дуги (р-н с. Мухоматка-мыс Ифигении): $\text{TiO}_2 < 0,6$ вес. %, $\text{MgO} > 8$ вес. %, $\text{Ba/Yb} > 400$ etc., подтверждают предположение о деплетированном магматическом источнике в фронтальной части дуги «fore-arc».

Ключевые слова: Тетис, Карадагская группа вулканов, изотопно-геохимические индикаторы, «back-arc», Nb/Yb, Nd-Sr, геодинамическая эволюция.

Различные исследователи неоднозначно трактуют и геодинамическую позицию, и геологическое строение «Карадагской группы вулканов», согласно определению Левинсона-Лессинга [1].

В современной геотектонической позиции Карадаг является составной частью Альпийского складчатого пояса, сформированного на послемеловом этапе развития складчатых зон Тетиса.

Карадагская группа вулканов представляет собой уникальное горное сооружение, состоящее из средне- и верхнеюрских вулканических пород широкого петрографического спектра от базальтов до риолитов, трахилипаритов дайковой серии — фрагментов трех этапов извержений, разделенных длительными промежутками времени: в форме отдельных лавовых потоков, в том числе с шаровыми лавами, сложных туфо-лавовых свит, некков, даек, жил, субинтрузивных массивов, в совокупности круто поставленных вследствие интенсивного проявления послемеловых геодинамических процессов в процессе Альпийского орогенеза.

«Безоливиновые», по Левинсону-Лессингу, базальты раннего этапа [1] (с диабазовой структурой) прослежены в акватории залива от береговой линии (Кузьмичев камень) более чем на 650 м, что с учетом их близвертикального залегания позволяет считать это расстояние минимальной мощностью свиты. Абсолютный возраст базальтов, по данным К/Аг метода, составляет 196 ± 4 млн лет, трахилипаритов (Хоба-Тепе) — 150 ± 5 млн лет, кайнотипных дацитов третьего этапа (Береговой хребет) с неизменными стеклом и вкрапленниками P_{I70-73} — 74 ± 16 млн лет (зафиксировано высокое содержание аргона). Породы всех этапов вулканизма относятся преимущественно к толеитовой серии дифференциации, андезито-дациты, риолиты заключительных стадий второго этапа — к известково-щелочной серии.

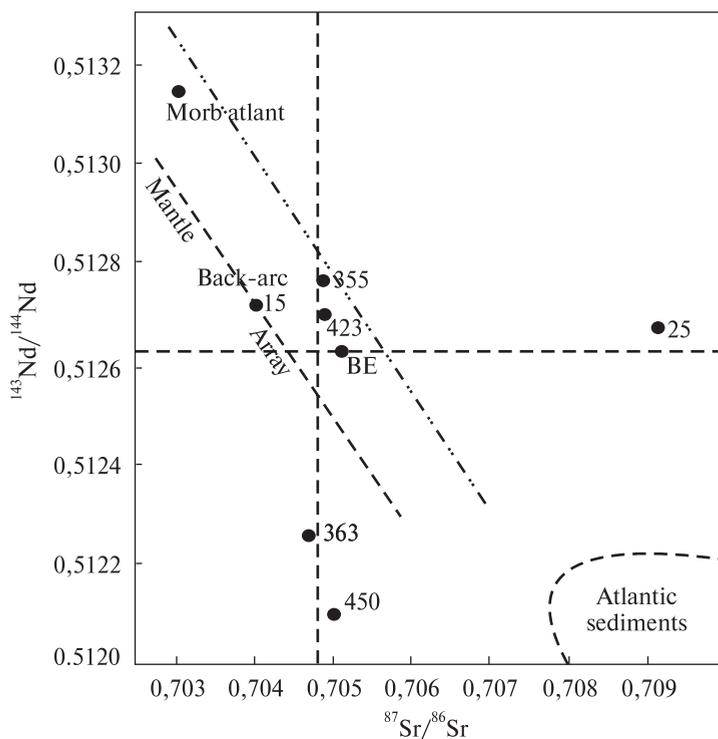


Рис. 1. Sr-Nd изотопный состав back-arc и island-arc вулканических пород Карадага: 15 — базальт раннего этапа, 25 — трахилипарит, 355, 423 — кайнотипные андезито-дациты

«Палеотипные», по терминологии Левинсона-Лессинга, породы первого и второго циклов извержений пропилитизированы (низкотемпературный метаморфизм) с разной степенью интенсивности. В свежем стекле дацитов «кайно-типной» серии обнаружены микровключения золота.

Комплекс геологических, петролого-изотопно-геохимических исследований, проведенный нами за многие годы изучения района, дал возможность определить островодужную, субдукционно обусловленную природу вулканизма Карадага [3], одного из фрагментов магматической Крымской юрско-меловой палеоостровной дуги [2], а также изложить представление о формировании вулканических пород различных серий из мантийного и корово-литосферного источника [4].

На изотопной диаграмме $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} - ^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, базальты раннего этапа (~190 млн лет) и неизменные дациты заключительного этапа (~80 млн лет) лежат в поле «мантийной последовательности» (0,5127–0,7042); (0,51277–0,70497), дайки массива Хоба-Тепе — трахилипариты, в различной степени пропилитизированные расположены — на линии смешения мантия-кора — ($\text{K}_2\text{O} - 6-7$ вес. %) ~160 млн лет, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} - (0,5126)$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} - 0,7094$ (рис. 1).

Содержание редких, рассеянных, редкоземельных элементов в вулканитах Карадага, по данным ICP-MS

Элемент, ppm	Номер пробы							
	355	436	33-а	13	15	423	25	141
Nb	2,8	1,8	1,2	3,6	12	3,0	3,6	0,7
Zr	76,8	66,5	59,7	124	106	128	136	44,1
Y	23,5	21,0	17,2	35,1	1	28	31	14,4
Th	3,7	2,9	2,4	4,7	1,8	5,0	4,9	1,7
Ba	148	240	288	249	124	349	442	732
Co	10,3	25,2	17,8	6,6				33,7
Hf	2,6	1,6	1,7	3,3				1,2
Rb	10,3	8,8	15,4	30,1	8	32	52	7,6
Sr	393,0	249,3	260,6	184,9	327	283	118	326
Ta	0,3	<0,1	<0,1	0,2	н.о.			0,1
U	0,6	1,7	0,4	1,2	<1			0,3
V	220	311	336	73				226
La	14,4	11,0	9,6	19	12,98	16,2	9,3	13,0
Ce	30,9	24,3	21,3	41,8	27,8	39,8	26	26,9
Pr	3,75	3,07	2,62	5,08	3,26	4,86	2,54	3,05
Nd	16,6	13,2	11,4	22,1	14,35	21,5	15,2	11,1
Sm	3,77	3,06	2,63	5,26	3,24	5,27	4,08	2,26
Eu	1,15	1,06	0,90	1,48	1,28	1,33	1,22	0,60
Gd	4,04	3,48	2,95	5,97	3,7	5,53	4,73	2,56
Tb	0,60	0,55	0,47	0,92	0,61	0,95	0,85	0,40
Dy	3,88	3,48	3,06	5,61	3,49	5,89	5,58	2,78
Ho	0,85	0,81	0,67	1,25	0,68	1,21	1,18	0,51
Er	2,4	2,31	1,75	3,53	2,08	3,9	3,86	1,37
Tm	0,37	0,36	0,30	0,56	0,31	0,6	0,59	0,22
Yb	2,43	2,29	1,78	3,49	1,87	3,59	3,68	1,35
Lu	0,36	0,36	0,30	0,58	0,31	0,70	0,69	0,21

Примечание: номера проб: 355-13 — анализы выполнены Acme Lab, Canada, 15—141 — анализы выполнены в лаборатории Ин-та геохимии, минералогии и рудообразования им. Н.П. Семенико НАН Украины, 2013 г.; проба 144 — район Мухолатка.

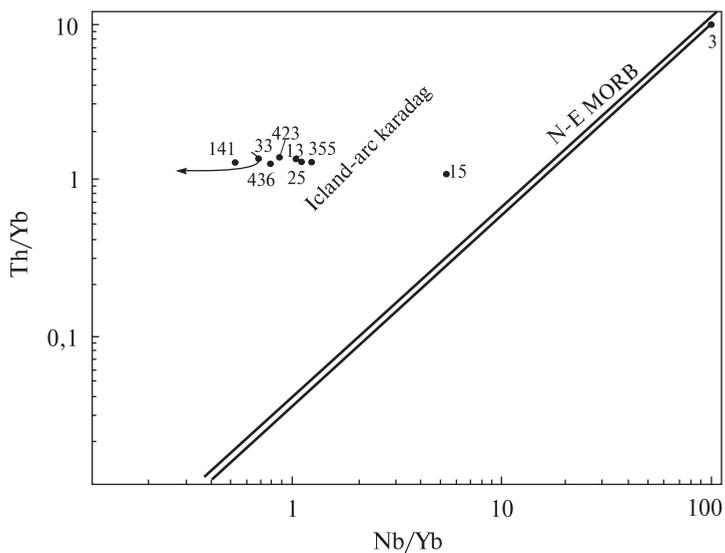


Рис. 2. Положение точек соотношений Th/Yb—Nb/Yb (ICP) в вулканических породах отдельных фрагментов дуги: 141 — Мухолатка, 15 — базальт безоливиновый, близко расположенный к линии тренда базальтов MORB, № 33—355 — андезиты-дациты 2—3 этапов извержений Карадага

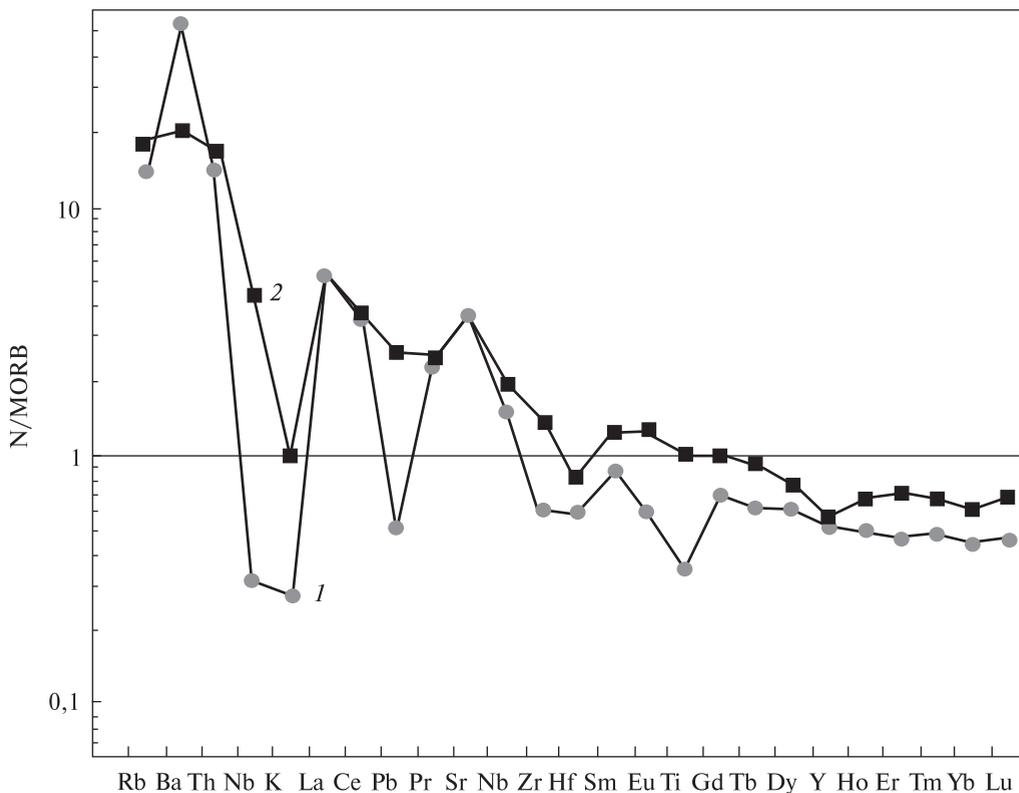


Рис. 3. Гистограмма нормированных по [N—MORB] значений: 1 — базальт Карадага, 2 — базальт Мухолатки

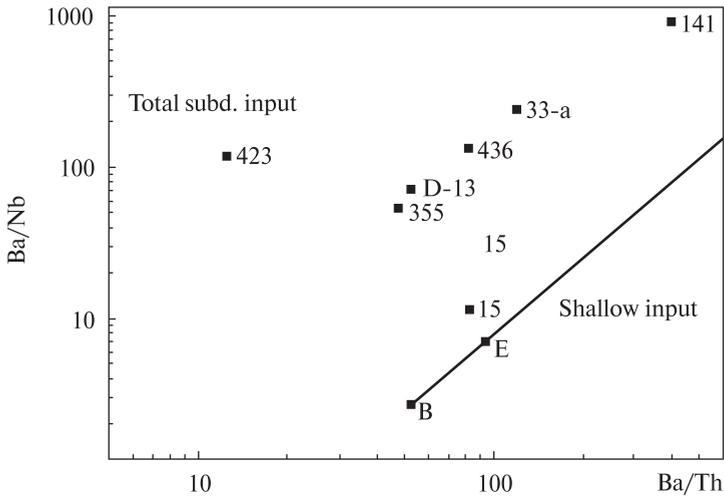


Рис. 4. Отношения Ba/Nb-Ba/Th. В-Е — фрагмент линии тренда базальтов MORB [6], т. Е — позиция базальтов, производных обогащенной мантии

Геодинамическую эволюцию Тетиса домелового времени признанные авторитеты в области региональной геотектоники трактуют неоднозначно. Так, в наиболее информативных обзорах, Робертсон (2004—2012 гг.) подчеркивает [5], прежде всего, противоположные трактовки направленности погружения литосферной плиты Лавразии относительно Гондваны в Восточном Средиземноморье во время закрытия Тетиса: как в южном, по утверждению А.М.С. Sengor, так и в северном направлениях.

Для идентификации геодинамической позиции фрагментов Крымской палеостровной дуги, наиболее благоприятных для формирования потенциально рудоносных водонасыщенных магм, которые формируются, прежде всего, в надсубдукционных зонах, мы сделали попытку привлечь систему отношений элементов-индикаторов редких и редкоземельных элементов [6], которые помогают идентифицировать источники магматизма [7 и др.], и способствуют установлению их геодинамической позиции.

Изучение направленности процессов формирования современных островных дуг изотопно-геохимическими методами, основанными на теоретических и экспериментальных исследованиях, в т. ч. общепризнанных установленных коэффициентах распределения в системах минерал — флюид и минерал — расплав с последующим определением коэффициентов распределения: мантия — расплав, плита — флюид или силикатный расплав — мантия — флюид и др., выполненными коллективами исследователей эволюции систем Тихоокеанских островных дуг: Японской, Инзу-Бонинской, Марианской [6, 7] в совокупности с рядом установленных закономерностей направленности мантийно-флюидных потоков, дали возможность определить ряды элементов, концентрирующихся преимущественно в мантийных расплавах либо в магмах надсубдукционных зон, в том числе: совместимых-несовместимых, консервативных-неконсервативных с последующим выявлением отношений наиболее информативных элементов-индикаторов, которые не фракционируют в процессах частичного плавления и фракционной кристаллизации [6].

Наиболее значимы соотношения («ргоху», J. Pearce[6]): Nb/Yb — индикатор степени обогащения мантийного источника, Ba/Yb — индикатор общего вклада субдукционной компоненты, Th/Yb — индикатор глубинной компоненты субдукционных зон и др.

В процессе исследований содержания REE и TR элементов определяли в ограниченном числе проб вулканических пород Карадага в сертифицированных лабораториях (таблица): чувствительность определения — Nb — 0,1 ppm, более 100 проб — методом рентгено-спектрального анализа, чувствительность — Nb — 2 ppm;) в том числе и из центральных районов палеодуги (мыс Ифигении — Мухолатка и др.).

В значительном числе графиков M/Y — Nb/Y, построенных по данным рентгено-спектрального анализа (не показаны, корреляция Yb — Y не превышает 0,8—0,9), позиция вулканических пород Крымской палеостровной дуги идентична позициям вулканических пород островных дуг западной части Тихоокеанского кольца, преимущественно Марианской [6], аналогично позиции на графиках M/Yb — Nb/Yb (рис. 2—4).

Позиция точек соотношений Th/Yb — Nb/Yb (рис. 2) в вулканических породах отдельных фрагментов дуги позволяет прийти к выводу, что степень обогащенности источников вулканизма существенно меняется. За исключением базальтов раннего этапа Карадагской группы вулканов наиболее приближенных к тренду базальтов — MORB (диагональная линия тренда источников базальтов срединно-океанических хребтов) — вулканические породы разной кремнекислотности второго и третьего этапов вулканизм Карадага и других вулканических массивов Крымского орогена тяготеют к полю островодужных систем, и особенно Марианской, по данным [6, 7]. Отношения Nb/Yb-Th/Yb обогащенности мантии в вулканических породах дуги не изменяются в процессах кристаллизационной дифференциации [7]. Отчетливое понижение отношения Nb/Yb от N-MORB тренда демонстрирует возрастание степени деплетации магматических источников вулканических пород Крымской палеостровной дуги от Карадага к западной ее части. Показано минимальное отклонение от источника MORB базальтов раннего этапа.

Наиболее деплетированные источники вулканических пород (Мухолатка, Ифигения — центральная часть дуги) определяются на графиках позицией, присущей деплетированным мантийным источникам, в процессе эволюции значительно обогащенных флюидами надсубдукционной зоны, что также подтверждается индикаторными соотношениями макро- и микроэлементов. На гистограмме освещена степень субдукционного обогащения (проба №1, MgO — 8,6 %, Мухолатка) для нее характерно обогащение Ba, Rb, S и деплетация TR, REE сравнительно с базальтом Карадага (MgO — 6,3 %, проба №15). Наиболее значительное обогащение субдукционной составляющей в западной части дуги (fore-arc).

На графиках процент привноса флюидной компоненты субдукционных зон возрастает по мере удаления от линии тренда, определенной для базальтов MORB, и достигает почти 90 % (обр. 141) на сравнительных диаграммах различных серий современных островных дуг J. Pearce [6 и др.] в ряду Nb/Yb; M/Yb, где M — Th, La, Sr, Nd, Ba, Zr. Отношения Ba/Nb-Ba/Th информативны при определении степени суммарного вклада субдуцированного материала в формирование магматического очага, где Ba/Nb — индикатор суммарного привноса, индикатор Ba/Th позволяет оценить вклад флюидно-магматических систем надсуб-

дукционных зон в отличие от соотношения Th/Va-индикатора поступления из глубинных корневых частей субдукционной зоны.

Единичные определения изотопного состава кислорода базальтов раннего этапа ($\delta^{18}\text{O} - 5,8-6,2 \text{‰ smow}$) свидетельствуют об их мантийной природе, изотопный состав кислорода дацитов дайковой серии (с неизменным стеклом) варьирует от +6,8 до +10,9 ‰, что характерно для вулканических пород островных дуг, но не исключает взаимодействия с разнотемпературными флюидами.

Изотопный состав кислорода андезито-дацитов второго этапа изменяется от 19 ‰ в пропилитизованных вулканитах до 1,3 ‰ в локальных зонах гидротермального изменения.

Наличие «back-arc» среднеюрского времени усложняет современные представления о эволюции Тетиса, строении «Silk Road Arc» [8] в строении Крымской палеоостровной дуги, обуславливая необходимость дальнейших исследований. Определенные нами неординарные черты исследуемых объектов должны внести существенные коррективы в представления об истории геологического развития в целом Альпийско-Средиземноморского складчатого пояса, в пределах европейской части которого существуют промышленные месторождения различных генетических типов, в том числе эпитермальные Cu-Au, золотые эрогенные, массивные сульфидные с тонким золотом и другие — «Евразийский металлогенический пояс». Установлено, что значительная часть известных месторождений Альпийского пояса формируется в субдукционно связанных ситуациях, аналогичных геодинамической ситуации формирования отдельных фрагментов Крымской палеоостровной дуги, определенных нами, то есть благоприятных для генерации водосодержащих магм, во время становления продуцирующих значительные объемы флюидов.

Выводы

Мы впервые идентифицировали геодинамическую позицию отдельных звеньев юрско-меловой Крымской палеоостровной дуги на основе полученных минералого-геохимических, изотопных (Nd-Sr) данных, а также основываясь на соотношениях REE и TR элементов — индикаторов геодинамической эволюции, определенных и апробированных международными коллективами, преимущественно английских и австралийских ученых, в процессе изучения вулканических пород Западно-Тихоокеанских современных островных дуг.

Полученная информация позволяет нам утверждать, что вулканические породы Карадагской ветви палеоостровной дуги образованы из обособленных мантийных и корово-литосферных источников в системе «island-arc-back-arc» в пределах значительного промежутка времени — 190—70 млн лет и сформированы в едином круто поставленном массиве во время проявлений Альпийского орогенеза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левинсон-Лессинг Ф.Ю., Дьяконова-Савельева Е.Н. Вулканическая группа Карадага в Крыму. Лениздат, 1933. 151 с.
2. Палеоостровная дуга севера Черного моря. Под ред. Шнюкова Е.Ф. Киев, 1997. 287 с.
3. Шнюков Е.Ф., Красножина З.В., Сиденко О.Г. Золото и серебросодержащая сульфидная минерализация в вулканитах Горного Крыма. *Геол. журн.* 1993. № 5. С. 36—47.

4. Шнюков Е.Ф., Красножина З.В. Карадагская группа вулканов. К вопросу об источниках эффузивного магматизма. Геологические проблемы Черного моря. Киев, 2001. С. 207—215.
5. Robertson A.H.F. Sedimentary evidence from the south Mediterranean region (Sicily, Crete, Peloponnese, Evia) used to test alternative models for the regional tectonic setting of Tethys during Late Paleozoic — Early Mesozoic time. *Geological Society*. London, Special Publications January 1. 2006. V. 260. P. 91—154.
6. Julian A. Pearce, Stern R.J. Origin of back-arc basin magmas: trace element and isotope perspectives. *American Geophysical Union*. 2006. P. 84.
7. Erin Todd, A. James, B. Gill, Julian A. Pearce. A variably enriched mantle wedge and contrasting melt types during arc stages following subduction initiation in Fiji and Tonga, southwest Pacific. *Earth and Planetary Science Letters*. 2012. P. 180—194.
8. Yigit O. Gold in Turkey — a missing link in Tethyan metallogeny. *Ore Geology Reviews*. 2006. V. 28. P. 147—179.

Статья поступила 30.06.2019

З.В. Красножина

ГЕОДИНАМІЧНА ЕВОЛЮЦІЯ КАРАДАЗЬКОЇ ГРУПИ ВУЛКАНІВ

Петролого-ізоотно-геохімічні дослідження вулканічних порід Кримської палеоостровної дуги (в наземній частині й акваторії Чорного моря), а також дані Nd-Sr ізотопії разом з установленими інформативними співвідношеннями TR та REE елементів — індикаторів геотектонічної позиції дають підстави розглядати продукти вулканізму дуги як релікти різновікових фрагментів островних дуг Палео-Нео-Тетису, суміщені в процесі Альпійського орогенезу, зокрема ідентифіковані нами прояви «back-arc» вулканізму Палео-Тетису в складі вулканітів Карадазької групи вулканів. Сукупність отриманої інформації та співвідношення TR та REE елементів — індикаторів геотектонічної позиції допомагає ідентифікувати базальти нижньої серії першого етапу вулканізму Карадагу як продукти «back-arc» задугового вулканізму, або залишкової дуги Палео-Тетису (196 ± 4 млн рр., K/Ar), характеристики джерела магми якого можна порівняти з джерелом базальтів MORB, зокрема: Nb/Yb — 5, Ba/Yb — 12; $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ — 0,5128; $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ — 0,7039). Вулканічні породи подальших стадій вивержень, із великою ймовірністю, є продуктами різноглибинних деплетованих магматичних джерел послідовних стадій еволюції островодужної системи Мезо-Тетису з різномасштабним внеском субдукційної складової (трахіліпарити другого етапу 150 ± 5 млн рр., (K/Ar), Nb/Yb — 0,8, Ba/Yb — 98; $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ — 0,5126; $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ — 0,7094; кайнотипні дацити третього етапу — 74 ± 16 млн рр., (K/Ar); Nb/Yb — 1,15; $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ — 0,5127, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ — 0,7049, Ba/Yb — 60,9. Породи всіх етапів вулканізму належать переважно до толейтової серії диференціації, андезито-дацити, ріоліти заключних стадій другого етапу — до вапняно-лужної серії. Ізоотно-мінералого-геохімічні характеристики вулканічних порід центральної частини дуги (Мухолатка — мис Іфігенія): $\text{TiO}_2 < 0,6$ мас. %, $\text{MgO} > 8$ мас. %, Ba/Yb > 400 etc., підтверджують припущення про деплетоване магматичне джерело в фронтальній частині дуги «fore-arc».

Ключові слова: Тетіс, Карадазька група вулканів, ізоотно-геохімічні індикатори, «back-arc», Nb/Yb, Nd-Sr, геодинамічна еволюція.

Z.V. Krasnozina

GEODYNAMIC EVOLUTION OF THE KARADAG VOLCANO GROUP

Petrological and isotope-geochemical studies of volcanic rocks of the Crimean paleoarc (in the ground part and the Black sea), including data from the Nd-Sr isotope together with the set of informative ratios TR, REE elements-indicators of geotectonic positions allow us to consider products of arc volcanism, as relics of a different age of fragments of island arcs of the Paleo-Neo-Tethys, overlap during the Alpine orogeny, in particular, we identified examples of «back-arc» volcanism of Paleo-Tethys in the composition of the volcanic rocks of the Karadag volcano group. The totality of the information received, including the ratio of TR, REE elements-indicators of geotectonic positions allows to identify the basalts of the lower series of the first phase of Karadag volcanism as products «back-arc» volcanism, or residual arc Paleo-Tethys (196 ± 4 Ma, K/Ar), characteristics of the source magma which is

comparable to the source of MORB basalts in the Nb/Yb — 5, Ba/Yb — 12; $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ — 0,5128; $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ — 0,7039). The volcanic rocks of the later stages of the eruptions with a high probability are products of different depths and depletion magmatic sources at successive stages of the evolution of the island arc system of the Meso-Tethys with multiscale contribution of the subduction component (trachyliparites stage 2 — 150±5 million (K/Ar), Nb/Yb — 0,8, Ba/Yb — 98; $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ — 0,5126; $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ — 0,7094; Kainotype dacites 3 phase (74±16 Ma, K/Ar); Nb/Yb — 1,15; $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ — 0,5127, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ — 0,7049, Ba/Yb — 60,9. Rocks of all stages of the volcanism mainly relate to tholeiite series of differentiation, andesite-dacites, rhyolites final of the second stage to the limestone-alkaline series. Isotope-mineralogical and geochemical characteristics of volcanic rocks of the central part of the arc (Muholatka — Iphigenia): $\text{TiO}_2 < 0,6$ wt. %. $\text{MgO} > 8$ wt. %, Ba/Yb > 400 etc., confirm the assumption of a depleted magma source in the front arc of «fore-arc».

Keywords: Tethys, Karadag volcanic group, isotope-geochemical indicators, «back-arc», Nb/Yb, Nd-Sr, geodynamic evolution.