

УДК 552.323.5

Ю.А.МАРТЫНОВ, А.В.РЫБИН, С.И.ДРИЛЬ, А.Ю.МАРТЫНОВ

Зоны аномального вулканизма Курильских островов, остров Парамушир

Новые прецизионные изотопно-геохимические данные свидетельствуют об аномальном характере вулканизма трех наиболее крупных островов Курильской островной дуги: Кунашир, Итуруп, Парамушир. Аномальный вулканизм о-ва Парамушир является следствием распространения под северные Курилы температурной аномалии, реконструируемой под южной Камчаткой, вовлечения в магмогенезис расплавов, связанных с плавлением субдукционного осадка.

Ключевые слова: субдукция, вулканизм, Курильская островная дуга, микроэлементы и радиогенные изотопы, аномальный вулканизм, субдукционный осадок.

Anomalous volcanism of the Kurile Islands, Paramushir Island. Yu.A.MARTYNOV (Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok), A.V.RYBIN (Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk), S.I.DRILL (Institute Geochemistry, SB RAS, Irkutsk), A.Yu.MARTYNOV (Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok).

New precise isotope and geochemical data testify about the abnormal type of volcanic activity on the biggest of the Kurile Islands: Kunashir and Iturup in the south and Paramushir in the north. Anomalous volcanism of the northernmost island is the result of spreading the thermal anomaly, earlier reconstructed beneath the southern Kamchatka, beneath the northern Kurile, and involvement of sediment melt in magmagenesis.

Key words: subduction, volcanism, Kurile island arc, trace elements and radiogenic isotopes, anomalous volcanism, subduction sediment.

Островодужные системы являются ключевыми структурными элементами плитовой тектоники, зонами активного взаимодействия вещества коры и мантии, формирования основных геохимических резервуаров нашей планеты. Изучению этих структур уделялось и уделяется огромное внимание, но многие аспекты их функционирования до сих пор остаются непроясненными. В полной мере это относится к магматическим породам, значительно более комплексным по своему генезису, чем, например, базальты срединно-океанических хребтов (mid-oceanic ridge basalts, MORB) или океанических островов (oceanic islands basalts, OIB). Кроме надсубдукционной мантии, в островодужном магмогенезисе значительную роль играют субдукционные компоненты, образованные в результате дегидратации или плавления океанической коры и осадков. Дополнительную неопределенность вносят «несубдукционные» факторы: варьирующий геодинамический режим, гетерогенность литосферной мантии, коровая контаминация, активность задуговых тектоно-магматических событий, трансформных разломов и др.

Важнейшим инструментом оценки вклада различных компонентов в магмогенезис является изучение пространственно-временных вариаций составов магматических пород.

МАРТЫНОВ Юрий Алексеевич – доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией (Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток), РЫБИН Александр Викторович – кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией (Институт морской геологии и геофизики, Южно-Сахалинск), ДРИЛЬ Сергей Игоревич – кандидат геолого-минералогических наук (Институт геохимии СО РАН, Иркутск), МАРТЫНОВ Алексей Юрьевич – аспирант (Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток). E-mail: martynov@fegi.ru

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 07-05-00310 и проекта ДВО РАН 09-3-А-08-418.

Для Курильских островов такая информация носит ограниченный характер [7, 14]. В данной статье вопросы продольных латеральных вариаций составов четвертичных вулканитов рассматриваются на основе новых микроэлементных и изотопных данных, полученных с использованием современной элементной аналитической базы (ICP MS, Институт геохимии СО РАН, Иркутск; многоколлекторный ICP MS, университет Шимане, г. Матсуге, Япония).

Изученность

Северо-восточная Япония и Курильская островная дуга формировались в позднем кайнозое на восточной окраине Евразийского континента в ассоциации с тыловодужными морскими котловинами Японского и Охотского морей. Если северо-восточная Япония изучалась очень интенсивно, то данные по Курильской островной дуге немногочисленны. Микроэлементная и изотопная аналитика ограничена отдельными вулканическими центрами [2, 5, 7]. После пионерной работы Д.З.Журавлева с соавторами [3] новая информация по изотопии неодима, например, появилась лишь для некоторых вулканов Итурупа [10] и прилегающей акватории Курильской глубоководной котловины [9]. Практически отсутствуют свинцовые изотопные данные.

Из-за слабой геохимической изученности многие представления о магмогенезисе остаются дискуссионными. Наиболее детально, с использованием качественных аналитических данных, эта проблема рассматривалась в работе [14]. Принимая во внимание линейную корреляцию $\delta^{11}\text{B}$ с $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ и Nb/B во фронтальных и тыловодужных лавах, авторы пришли к выводу о двух изотопно-гомогенных компонентах вулканических пород: надсубдукционного мантийного клина и субдукционного флюида. Происхождение слабой продольной геохимической зональности, связанной с возрастом в северном направлении щелочности вулканических пород, рассматривалось как результат небольших вариаций литологии субдуцирующего осадка [8, 14].

Краткий геологический очерк

Курильская островодужная система включает Курило-Камчатский глубоководный желоб, Большую Курильскую вулканическую гряду и Курильскую глубоководную котловину Охотского моря. При постоянной скорости конвергенции около 8,6 см/год возраст субдуцирующей океанической коры увеличивается от 90 млн лет на севере до 118 млн лет на юге. С древним возрастом погружающейся океанической плиты согласуется значительная максимальная глубина землетрясений (до 650 км). Все участки островной дуги классифицируются как зоны умеренного сжатия [8].

Курило-Камчатский глубоководный желоб заполнен океаническими осадками с примесью континентального дэбриса (17–80 об.%), кремнистого биогенного материала (около 9 об.%), вулканического пепла (первые об.%) и небольшого количества карбонатов. Пропорция континентальных осадков увеличивается в южном направлении [8].

Формирование Большой Курильской вулканической дуги началось в раннем миоцене или в олигоцене. Общая ее протяженность превышает 1150 км при ширине 100–200 км. Сейсмофокальная зона под вулканическим фронтом расположена на глубине 94,2 км под северными Курилами, 92 км – под южными [23]. Мощность континентальной коры меняется незначительно: 28–33 км на юге, 25–30 в центре, 32–36 на севере [4]. Континентальную природу коры подтверждают ксенолиты метаморфических пород (плаггиоклаз-пироксеновых гранулитов, кристаллических сланцев).

Начало формирования Курильской котловины относят к раннему–среднему миоцену (32–15 млн лет). В плиоцене произошла смена режима растяжения на сжатие [9], но магматические процессы продолжали оставаться активными, по крайней мере, до раннего плейстоцена. Об этом свидетельствует высокий тепловой поток (до 105 мВт/м²) и присутствие четвертичных (0,84–1,07 млн лет) подводных вулканов [9].

Геохимия

Хотя все проанализированные образцы характеризуются низким содержанием TiO_2 , Nb, Ta и высоким Al_2O_3 , Rb, Ba, U, Th, K, указывающими на субдукционную природу родоначальных магм, многие исследователи отмечали наличие продольной геохимической зональности, связанной с возрастанием с юга на север содержания калия в вулканических породах [1]. Наши данные подтверждают этот вывод, хотя правильнее говорить не о зональности как постепенном изменении составов, а об аномальных изотопно-геохимических характеристиках лав трех крупнейших островов. Четвертичные эффузивы двух южных островов, Кунашир и Итуруп, отличаются крайне низкие концентрации некогерентных элементов, указывающие на деплетированный характер первичных магм [5]. В противоположность этому сходные по кремнекислотности вулканы о-ва Парамушир, объекта данного исследования, аномально обогащены калием, легкими лантаноидами (light rare earth elements, LREE) (рис. 1), высокозарядными катионами, но заметно деплетированы в отношении MgO (< 7 мас.%).

Различия в изотопных отношениях Sr, Nd, Pb выражены менее отчетливо из-за ограниченной области вариаций изотопных составов курильских лав по сравнению с составами лав других островных дуг Северо-Западной Пацифики, включая Японскую [21]. Основные и средние вулканы о-ва Парамушир характеризуются устойчиво более высоким $^{43}Nd/^{144}Nd$ отношением [6]. На диаграммах $^{206}Pb/^{204}Pb - ^{208}Pb/^{204}Pb$ их фигуративные точки формируют самостоятельное поле с относительно низкими $^{208}Pb/^{204}Pb$ и высокими $^{206}Pb/^{204}Pb$ значениями (рис. 2). Обогащение радиогенным ^{206}Pb наблюдается и для драгированных образцов подводных вулканов, расположенных в тыловой зоне северного звена Большой Курильской гряды [1], что подтверждает полученные нами данные.

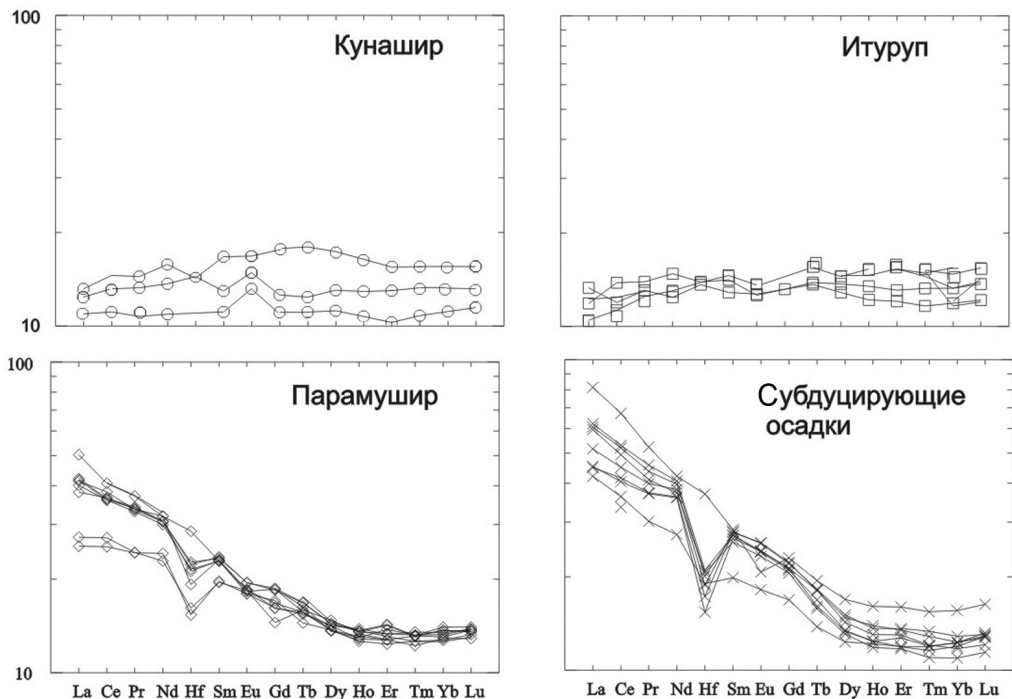


Рис. 1. Нормализованные к среднему базальту срединно-океанических хребтов концентрации редкоземельных элементов и Hf в базальтах фронтальной зоны Курильской островной дуги и субдуцирующих осадках. Данные по валовому составу осадков из [22]

Обсуждение результатов

Сходство основных геологических и геодинамических параметров субдукционного процесса на всем протяжении Курильской островной дуги (возраст океанической плиты, мощность коры, глубина до сейсмофокальной зоны) предполагает однотипность магматических процессов. Но геологические и геохимические данные противоречат такому заключению. Существенные вариации размеров островов, учитывая их вулканогенное происхождение, свидетельствуют о различной продуктивности магмогенерирующей системы, аномально высокой на флангах, в зоне локализации трех крупнейших островов островной дуги: Парамушир на севере, Итуруп и Кунашир на юге. Все 3 острова, кроме того, характеризуются определенными геохимическими особенностями вулканических продуктов.

Роль коровой контаминации. Коровая контаминация рассматривается многими исследователями как важный фактор, обеспечивающий геохимические вариации островодужных магматитов. Изотопно-геохимическая зональность четвертичных лав вулканического фронта северо-восточной Японии во многом определяется различием составов коровых расплавов-контаминантов [18]. Но в магмогенезисе Курильских островов этот процесс, видимо, не играл заметной роли. На диаграмме $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} - \text{SiO}_2$ четвертичные лавы вулканического фронта формируют субвертикальный тренд с относительно небольшими колебаниями SiO_2 (рис. 3), что может быть следствием изотопной гетерогенности надсубдукционной мантии, смещения обогащенного и деплетированного мантийных источников. Кристаллизационной дифференциации соответствует субгоризонтальный тренд, кристаллизационной дифференциации, сопровождаемой коровой контаминацией, – диагональный.

Изотопная гетерогенность надсубдукционной мантии. Для протяженных островодужных систем первичная изотопная мантийная гетерогенность, т.е. до метасоматического преобразования мантии субдукционными процессами, видимо, достаточно обычное явление, хотя ее распознавание представляет определенную сложность [13, 15]. Содержание радиогенного Sr, например, в значительной степени контролируется флюидной фазой, а первичные $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ и $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ отношения могут «маскироваться» субдукционным осадком, в котором концентрации свинца и неодима на порядок превышают мантийные.

Для Курильской островодужной системы наиболее информативными индикаторами мантийной гетерогенности являются $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ и $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ отношения. На рис. 2 вулканы северных Курил, с одной стороны, южных и центральных – с другой, формируют различные, но субпараллельные тренды. Первые, отличающиеся низкими концентрациями радиогенного ^{208}Pb , локализуются вблизи линии средних составов MORB Тихого океана и тяготеют к полю четвертичных лав Камчатки. Составы пород южных и центральных островов смещены в поле MORB Индийского океана, частично перекрывают область составов вулканических продуктов Японской островодужной системы. Подобные вариации не совпадают с расчетными линиями смещения деплетированной мантии и осадочного материала (рис. 2) и свидетельствуют о гетерогенной природе первичной мантии Курильских островов.

Вариации Nd изотопных характеристик в проанализированных образцах (рис. 3) можно описать моделью смещения надсубдукционной мантии и осадочного материала. Но близость лав южных островов Курильской гряды к вулканитам Японии, а Парамушира к вулканитам Камчатки с учетом свинцовых изотопных данных логичнее объясняется существованием двух изотопных мантийных доменов: обогащенного (типа MORB Индийского океана) на юге и деплетированного (близкого к MORB Тихого океана) на севере.

Природа субдукционного компонента. Геохимические особенности четвертичных вулканических о-ва Парамушир могут быть связаны с различными причинами, например более низкой степенью плавления или обогащенным составом магматического источника. Первое предположение не подтверждается ни геологическими, ни геохимическими данными. Парамушир является вторым по величине островом Курильской островной гряды, что, как отмечалось, свидетельствует о высокой продуктивности магматической системы и,

следовательно, степени плавления мантийного вещества. Повышенная калиевая щелочность четвертичных лав острова не сопровождается повышенными концентрациями натрия и титана. Хотя валовой коэффициент распределения Na_2O и TiO_2 несколько выше (~0,2) [19] такого для K_2O (~0,01) [17], при относительно высокой степени парциального плавления все три элемента должны вести себя когерентно.

Когерентное поведение трех элементов должно было бы наблюдаться и при плавлении обогащенного источника. Например, обогащенная мантия базальтов ОИВ характеризуется повышенными концентрациями калия, титана и натрия.

Различное поведение трех некогерентных петрогенных элементов может быть связано с вовлечением в магмогенез субдукционного осадка, концентрации K_2O в котором значительно более высокие, чем в типичных выплавках деплетированной мантии N-MORB типа.

Вовлечение осадочного материала в магмогенез северного острова подтверждают высокие значения $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (рис. 2), а также микроэлементные данные. Вулканы фронтальной зоны южных Курил обогащены элементами Ba, U, Cs, мобильными в водно-хлоридном флюиде [11]. Субвертикальный тренд этих пород на рис. 4 свидетельствует об определяющей роли субдукционного флюида (измененная океаническая кора и/или осадок) в их происхождении.

Рис. 2. Изотопные отношения $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ для курильских лав. 1, 2 – о-в Кунашир, фронтальная (1) и тыловая (2) зоны; 3, 4 – о-в Итуруп, фронтальная (3) и тыловая (4) зоны; 5 – острова Черные Братья; 6 – о-в Броутона; 7 – о-в Симушир; 8 – малые острова центральной зоны; 9 – о-в Парамушир; 10 – о-в Атласова; 11 – средний состав осадка Марианской островной дуги; 12 – состав осадка субдуцирующего под Камчатский и Курильский сегмент островной дуги [22]; 13 – валовой состав океанического осадка. Пунктиром околонуто поле тыловодужных лав северного звена Курильской островной дуги, сплошной линией – южного звена [1]. Пунктирные стрелки – линии смещения мантии с осадочным материалом. NHRL (Northern Hemisphere Reference Line) – линия средних составов океанических базальтов Северного полушария. BMS (bulk marine sediment) – валовой состав морского осадка

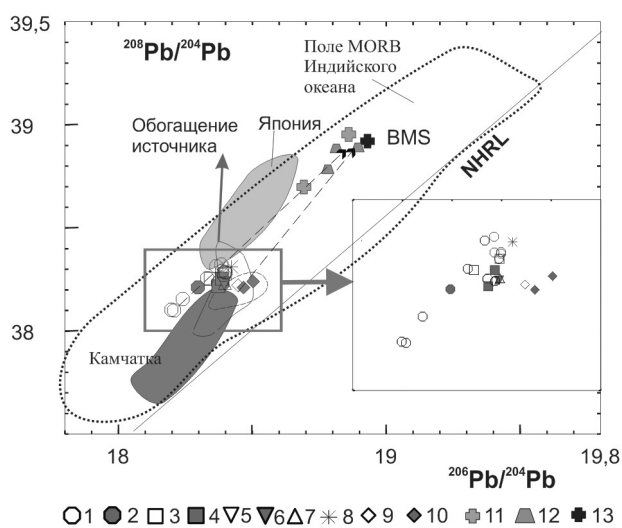
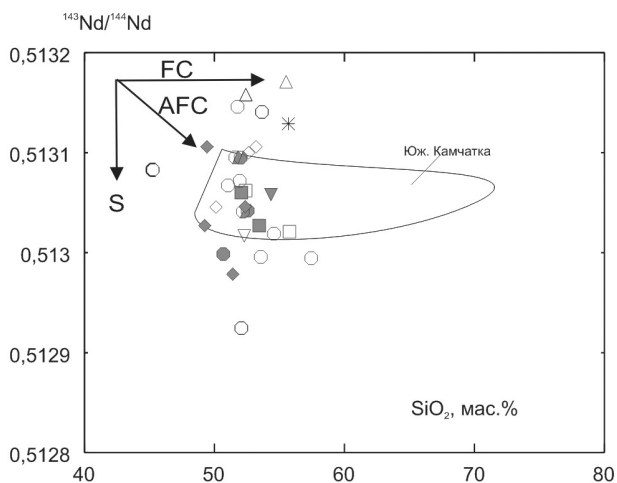


Рис. 3. Отношения $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ – SiO_2 в курильских вулканитах. Условные обозначения см. на рис. 2. Оконтулено поле составов лав вулканов Горелый и Мутновский [12]. FC – кристаллизационная дифференциация, AFC – кристаллизационная дифференциация с коровой контаминацией, S – вариации составов источника



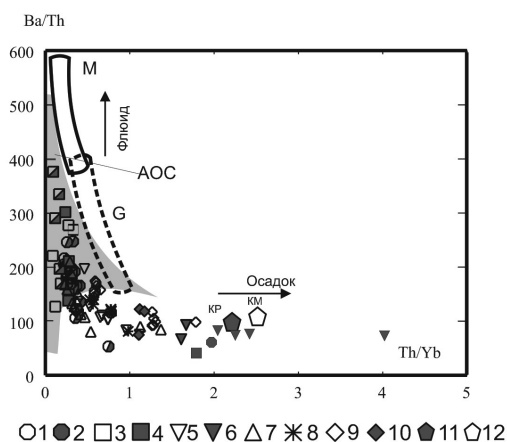


Рис. 4. Отношения Ba/Th – Th/Yb в четвертичных вулканитах Курильской островной дуги. 1–10 – см. на рис. 2; 11, 12 – средние составы осадков, субдицирующихся под Курильский (11) и Камчатский (12) сегменты островной дуги [22]. АОС – базальты измененной океанической коры, G, M – поля основных лав соответственно вулканов Горелый и Мутновский [12]

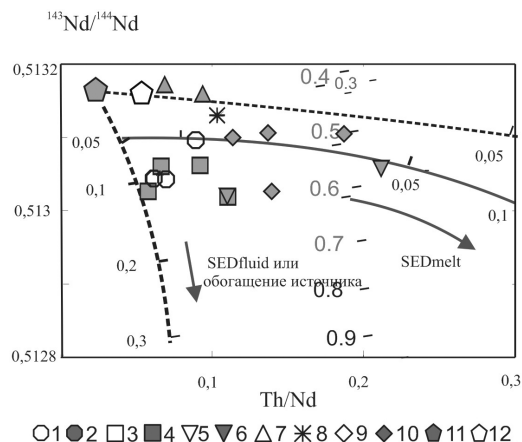


Рис. 5. Диаграмма $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ – Th/Nd. 1–10 – см. на рис. 2; 11 – АОС, 12 – рассчитанный состав АОС-флюида. Линии на диаграмме – рассчитанные линии смешения АОС с расплавом (SEDmelt) и флюидной фазой (SEDfluid), образовавшихся, соответственно, в результате плавления и дегидратации субдицирующего осадка. При расчетах состав осадка соответствовал валовому составу осадочного материала, субдицирующего под Курильскую островную дугу [22]; валовые коэффициенты распределения микроэлементов: 700°C для флюида, 900°C для расплава [15]

температуре поверхности субдицирующей океанической плиты. С учетом этого аномальный характер вулканизма о-ва Парамушир, вероятнее всего, связан с распространением на юг, в область северных Курильских островов, термальной аномалии, реконструируемой под южной Камчаткой [12, 20].

Многие исследователи рассматривают южную Камчатку как продолжение на север структур Курильской островной дуги. Но приведенные данные указывают скорее на продолжение структур южной Камчатки на юг, в пределы северных Курильских островов.

Фигуративные точки лав о-ва Парамушир отчетливо смещены в область высоких Th/Yb отношений, что с учетом высоких концентраций Th в океанических осадках и низких валовых коэффициентов распределения в системе осадок–расплав [16, 22] указывает на вовлечение в магматогенез расплавов, связанных с плавлением осадочного материала.

Осадочные выплавки также играли значительную роль в происхождении тыловодужных вулкаников. Th/Yb отношение в базальтах влк. Богдан Хмельницкий (о-в Итуруп), единственного доступного для наблюдений вулкана тыловой зоны южного сектора, близко к таковым фронтальных лав (рис. 4). Для продуктов извержения самого северного вулкана тыловой зоны – Алаид, а также подводного влк. Геофизиков, расположенного в пределах Курильской котловины [9], оно колеблется в пределах 0,9–1,7; для основных лав влк. Броутона, расположенного на границе южной и центральной зон, достигает 1,5–2,7.

На рис. 5 показаны расчетные линии смешения состава измененной океанической коры, флюида и расплава, образовавшихся соответственно в результате дегидратации и плавления осадочного материала. В петрогенезисе базальтов южных островов преобладающая роль принадлежала флюиду, образованному при дегидратации океанической коры, что в целом подтверждает результаты изучения В–Ве–Sr изотопной системы [14]. В магматогенезисе основных лав северных островов наряду с флюидной фазой принимал небольшое участие (менее 5 об.%) расплав осадочного происхождения.

Плавление осадочного материала свидетельствует о сравнительно высокой (~650–800°C по различным моделям)

Выводы

Вариации составов четвертичных лав вдоль Курильской островной дуги связаны не с постепенным изменением изотопно-геохимических характеристик, а с аномальным характером вулканизма трех крупнейших островов: Кунашир, Итуруп и Парамушир. Аномальный вулканизм о-ва Парамушир является следствием распространения под северные Курилы температурной аномалии, реконструируемой под южной Камчаткой, и вовлечения в магмогенезис расплавов, связанных с плавлением субдукционного осадка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авдейко Г.П., Рашидов В.А., Полуваева А.А., Романова И.М. Подводный вулканизм Курильской гряды: геодинамические условия и формирование геохимической специфики. – http://www.kscnet.ru/ivs/grant/grant_06/06-3-A-08-326/index.html (дата обращения: 02.01.2009).
2. Богатиков О.А., Цветков А.А. Магматическая эволюция островных дуг. М.: Наука, 1988. 248 с.
3. Журавлев Д.З., Цветков А.А., Журавлев А.З. и др. Латеральные вариации изотопных отношений неонима и стронция в четвертичных лавах Курильской островной дуги и их петрогенетическое значение // Геохимия. 1985. № 12. С. 1723-1736.
4. Злобин Т.К., Пискунов В.Н., Фролова Т.И. Новые данные о структуре земной коры в центральной части Курильской островной дуги // ДАН СССР. 1987. Т. 293. С. 185-187.
5. Мартынов Ю.А., Дриль С.И., Чашин А.А. и др. Геохимия базальтов островов Кунашир и Итуруп – роль несубдукционных факторов в магмогенезисе Курильской островной дуги // Геохимия. 2005. № 4. С. 369-383.
6. Мартынов Ю.А., Кимура Дж.И., Ханчук А.И. и др. Магматические источники четвертичных лав Курильской островной дуги: новые данные по изотопии стронция и неонима // ДАН. 2007. Т. 416, № 5. С. 670-675.
7. Bailey J.C., Frolova T.I., Burikova I.A. Mineralogy, geochemistry and petrogenesis of Kuril island-arc basalts // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1989. Vol. 102. P. 265-280.
8. Bailey J.C. Role of subducted sediments in the genesis of Kuril-Kamchatka island arc basalts: Sr isotopic and elemental evidence // *Geochem. J.* 1996. Vol. 30. P. 289-321.
9. Baranov B., Wong H.K., Dozorova K. et al. Opening geometry of the Kurile Basin (Okhotsk Sea) as inferred from structural data // *The Island Arc.* 2002. Vol. 11. P. 206-219.
10. Bindeman I.N., Bailey J.C. Trace elements in anorthite megacrysts from the Kurile Island Arc: a window to across-arc geochemical variations in magma compositions // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1999. Vol. 169. P. 209-226.
11. Brenan J.M., Shaw H.F., Ryerson F.J., Phinney D.L. Mineral-aqueous fluid partitioning of trace elements at 900°C and 2,0 Gpa: constraints on the trace elements chemistry of mantle and deep crustal fluids // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1995. Vol. 59. P. 3331-3350.
12. Duggen S., Portnyagin M., Baker J. et al. Drastic shift in lava geochemistry in the volcanic-front to rear-arc region of the Southern Kamchatkan subduction zone: Evidence for the transition from slab surface dehydration to sediment melting // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2007. Vol. 71. P. 452-480.
13. Elliot T. Tracers of the slab // *Inside the subduction factory. Geophysical Monography. American Geophysical Union,* 2003. Vol. 138. P. 23-45.
14. Ishikawa T., Tera F. Source, composition and distribution of the fluid in the Kuril mantle wedge: Constrain from across-arc variations of B/Nb and B isotopes // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1997. Vol. 152. P. 113-122.
15. Ishizuka O., Taylor R.N., Milton A., Nesbitt R.W. Fluid-mantle interaction in an intra-oceanic arc: constraints from high-precision Pb isotopes // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2003. Vol. 211. P. 221-226.
16. Jhonson M.C., Plank T. Dehydration and melting experiments constrain the fate of subducted sediments // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 1999. Vol. 13. doi:10.1029/999GC000014.
17. Kelemen P.B., Shimizu N., Dunn T. Relative depletion on niobium in some arc magmas and the continental crust: partitioning of K, Nb, La and Ce during melt/rock reaction in the upper mantle // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1993. Vol. 120. P. 111-134.
18. Kimura J.-I., Yoshida T. Contributions of slab fluid, mantle wedge and crust to the origin of Quaternary lavas in the NE Japan arc // *J. Petrol.* 2006. Vol. 47. P. 2185-2232.
19. Langmuir C.H., Klein E.M., Plank T. Petrological systematics of mid-ocean ridge basalts: constrains on melt generation beneath ocean ridges // *Mantle flow and melt generation at mid-ocean ridges / eds J.P.Morgan, D.K.Blackman, J.M.Sinton. Washington: AGU,* 1992. P. 183-280.
20. Manea V.C., Manea M. Thermal models beneath Kamchatka and the Pacific plate rejuvenation from a mantle plume impact // *Volcanism and subduction. The Kamchatka region. Geophysical monograph 172 / eds J.Eiuchelberger, E.Gordeev, M.Kasahara, P.Izbekov, J.Lees. Washington, DC,* 2009. P. 77-91.
21. Martynov A.Yu., Kimura J.-I., Martynov Yu.A., Rybun A.V. Geochemistry of late Cenozoic lavas on Kunashir Island, Kurile Arc // *The Island Arc.* 2009. В печати.
22. Plank T., Langmuir C.H. The chemical composition of subducting sediment and its consequences for the crust and mantle // *Chem. Geol.* 1998. Vol. 145. P. 325-394.
23. Syracuse E.M., Albers G.A. Global compilation of variations in slab depth beneath arc volcanoes and implications // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2006. Vol. 23. doi:10.1029/2005GC001045.