



УДК 551.21:551.24

Г. П. Авдейко, О. В. Бергаль-Кувикас

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
г. Петропавловск-Камчатский
e-mail: gavdeiko@kscnnet.ru*

Сценарии генезиса вулканических пород с внутриплитными геохимическими характеристиками (NEAB) на Камчатке

На Камчатке широко распространены вулканические породы островодужного (субдукционного) типа. Кроме того встречаются, хотя и небольшом количестве, породы NEAB для которых характерны повышенные содержания Nb и других высокорядных элементов. Известны, по крайней мере, три сценария их образования. Первый сценарий реализуется на Восточной Камчатке и на Камчатском перешейке в начальный период субдукции. NEAB лавы образуются в начальные периоды субдукции на Восточной Камчатке и на Камчатской перешейке путём плавления перидотита мантийного клина метасоматизированного адакитовым расплавом из океанической коры. Второй сценарий обусловлен образованием мантийного плюма в результате апвеллинга подсубдукционной мантии в разрыв слэба после остановки субдукции под Срединный хребет. Третий сценарий обусловлен декомпрессионным плавлением в зоне растяжения задугового спрединга на Западной Камчатке. Не совсем определена природа целочных базальтов Камчатского перешейка. Возможно, их образование связано с аккрецией океанических базальтов, сформированных при декомпрессионном плавлении по модели Хирано и др.

Введение

Генезис пород с внутриплитными геохимическими характеристиками в зонах субдукции является одной из наиболее обсуждаемых проблем в современной петрологической литературе [например, 23]. В англоязычной литературе они называются по характерному признаку — сравнительно высокому содержанию Nb: HNbB (высоко Nb базальт), NEB (обогащенный Nb базальт), NEAB (обогащенный Nb островодужный базальт). Последний термин представляется наиболее информативным, т. к. в нём отражён и признак высокого содержания Nb, и островодужный характер их местоположения и генезиса).

По современным представлениям вулканизм лав ОД связывается с субдукцией. В период становления модели субдукции возникла проблема генезиса островодужных магм. Пространственная связь и сопряжённость вулканизма Курило-Камчатской ОД с СФЗ была отмечена ещё А. Н. Заварицким [5]. Более подробно эта связь рассмотрена Р. З. Таракановым с соавторами [15].

В начальный периода была предложена гипотеза плавления субдуцируемой океанической коры. т. к. в результате плавления метаморфизованного базальта (амфиболит, эклогит) мог получиться только андезит, а во многих зонах субдукции преобладали андезиты возник так называемый термин «андезитовая линия». Модельные расчёты структуры поля температур зон субдукции показали, что температуры для плавления океанической коры недостаточны [например, 25–26] Затем была обос-

нована модель плавления перидотита мантийного клина, метаморфизованного летучими компонентами, в первую очередь воды, из субдуцируемой ОК [см. например 20, 22, 35], в том числе и для Курило-Камчатской дуги [1, 12, 35] Характерной чертой вулканических ОД является высокое содержание мобилизуемых флюидами, большеионных литофильных (LILE), лёгких редкоземельных элементов (LREE), глубокий Ta-Nb минимум на многокомпонентных спайдер-диаграммах редких элементов, низкие концентрации других высокорядных элементов (HFSE) — Zr, Hf, которые не мобилизуются водными флюидами. Появились данные о петрогеохимической и минералогической зональности. Данные об увеличении HFSE в тыловых частях дуг, свидетельствовали о возможности плавлении ОК на более глубоких уровнях субдукции, т. е. при более высоких температурах.

На основе тектоники литосферных плит были разработаны геохимические критерии, позволяющие различать геотектонические типы вулканизма островных дуг, (срединно-океанических хребтов (MORB), внутритрокеанических островов (OIB), зон задугового спрединга, рифтовых зон континентов [см. например 35]. Появились исключения. В Островных дугах, наряду с преобладающими типичными ОД лавами, стали встречаться нехарактерные породы с внутриплитными геохимическими характеристиками (OIB), в которых наблюдаются повышенные содержания HFSE, отсутствует Ta-Nb минимум, и адакиты, допускающие плавление ОК.

Материал и обсуждение

На карте (рис. 1) показаны местоположения пород с внутриплитными геохимическими характеристиками на Камчатке

Впервые на наличие пород с внутриплитными геохимическими характеристиками на Камчатке обратил внимание О. Н. Волынец с соавторами [3]. Он объяснял их появление вместе с типичными островужными породами возможным проявлением мантийного плюма, не отвергая модели субдукции.

Большим сторонником привлечения мантийных плюмов к объяснению NEAB-лав является А. В. Колосков [6, 7]. В статьях по породам с внутриплитными геохимическими характеристиками Кекукнайского массива [8, 9]. А. В. Колосков в качестве альтернативы модели субдукции предложил модель «флюидно-магматического эскалатора» аналогично мантийному плюму. В работе использованы геохимические данные по Кекукнайскому вулканическому массиву из статьи [8]

На Камчатке NEAB лавы известны в разных тектонических зонах: на Восточной Камчатке — в начальную стадию субдукции, в Срединном хребте, находящемся на завершающей стадии субдукции, на Западной Камчатке, где уже субдукция завершилась и на Камчатском перешейке, в пределах Валоваямского вулканического поля (ВВП), где вулканизм связан с субдукцией Пракомандорской плиты.

Мы рассматриваем образование NEAB-лав в рамках 2-х компонентной магматической модели субдукции. Одной компонентой является перидотит мантийного клина, второй — является вкладом субдукционной компоненты, которой может осуществляться как в виде флюида, так и в виде расплава или вместе флюида и расплава. В этом случае можно говорить о трёх компонентах.

На Восточной Камчатке и в пределах Камчатского перешейка (ВВП) NEAB встречается совместно с адакитами. В этих районах NEAB-лавы мы, вслед за более ранними работами [28, 32], рассматриваем образование NEAB в результате плавления мантийного клина, метасоматизированного расплавом океанической коры (адакиты) и флюидом. Обогащение Nb связано с метасоматизацией перидотита мантийного клина адакитовым расплавом, а наличие слабого Ta-Nb-минимума обусловлены большеионными и легкими редкоземельными LREE, которые мобилизуются водным флюидом.

Сценарий генерации NEAB лав в Срединном хребте мы объясняем за счёт перескока зоны субдукции в конце миоцена [2, 17]. Разрыв проявлен на сейсмографическом профиле, проходящем через зону перескока [21]. В разрыв произошло внедрение (апвеллинг) горячей подсубдукционной мантии (рис. 2). В первых публикациях [2, 17] мы связывали формирование NEAB метасоматозом мантийного клина расплавом ОК, который образуется в результате плавления на контакте ОК с подсубдукционной ман-

тией. В этом случае сценарий образования NEAB лав аналогичен предыдущему, но, к сожалению, мы не знаем состав расплава ОК, матасоматирующего мантийный клин. Это, несомненно, не адакит, так как ОК подвергается плавлению на значительно большей глубине, чем глубина образования адакитов (60–90 км).

С другой стороны, здесь возможно формирование мантийного плюма при апвеллинге горячей подсубдукционной мантии, при подъёме которого возможно декомпрессионное плавление по модели мантийного эскалатора А. В. Колоскова [9]. Этот процесс мы рассмотрим с использованием геохимических данных по геохимической эволюции пород Кекукнайского массива, приведённых в работе [8]. На диаграммах Th-Yb и Zr-Nb (рис. 3) видно, что породы посткальдерного этапа Кекукнайского массива обогащены HFSE и тяжёлыми редкоземельными элементами по сравнению с обедненными породами породами Восточно-Камчатского и Южно-Камчатского вулканических поясов, а также по сравнению с породами докальдерного этапа. Аналогичная картина наблюдается и на многокомпонентных спайдер-диаграммах Кекукнайского массива (рис. 4). Отчётливо видно, что с увеличением возраста массива возрастают содержания HFSE в том числе Nb и Ta и тяжёлых редкоземельных элементов. Это можно интерпретировать как вовлечение в магмогенезис более обогащенного мантийного источника. Мы полагаем, что таким источником может мантийный плюм, образованный в результате апвеллинга подсубдукционной мантии в разрыв Тихоокеанской плиты после прекращения субдукции под Срединный хребет. Возможно эти сценарии с плавлением океанической коры и с образованием мантийного плюма действуют одновременно и дополняют друг друга т. к. они не являются альтернативными. Наличие слабого Ta-Nb-минимума подтверждает вероятность вклада в образование NEAB (см. рис. 4) лав флюидной компоненты и являются подтверждением субдукционной природы рассматриваемого магматизма.

Широко проявленные на Западной Камчатке породы с внутриплитными геохимическими характеристиками наиболее вероятно образовались в результате проявления вулканизма задугового спрединга, в котором также присутствует субдукционная компонента. В этом случае основной вклад в формирование родоначальной магмы вносят компоненты мантийного плюма, образованного в результате наведенной субдукцией конвекции. Тем не менее субдукционная компонента проявляется в виде Ta-Nb-минимума, хотя и неглубокого, который встречается в большинстве проявлений вулканизма Западной Камчатки. Тем не менее в отдельных случаях Ta-Nb минимум отсутствует полностью. Например, базальты г. Хухч [10]. В этом случае, возможно, проявляется сценарий, разработанный [23] на основе экспериментальных данных. В этом случае

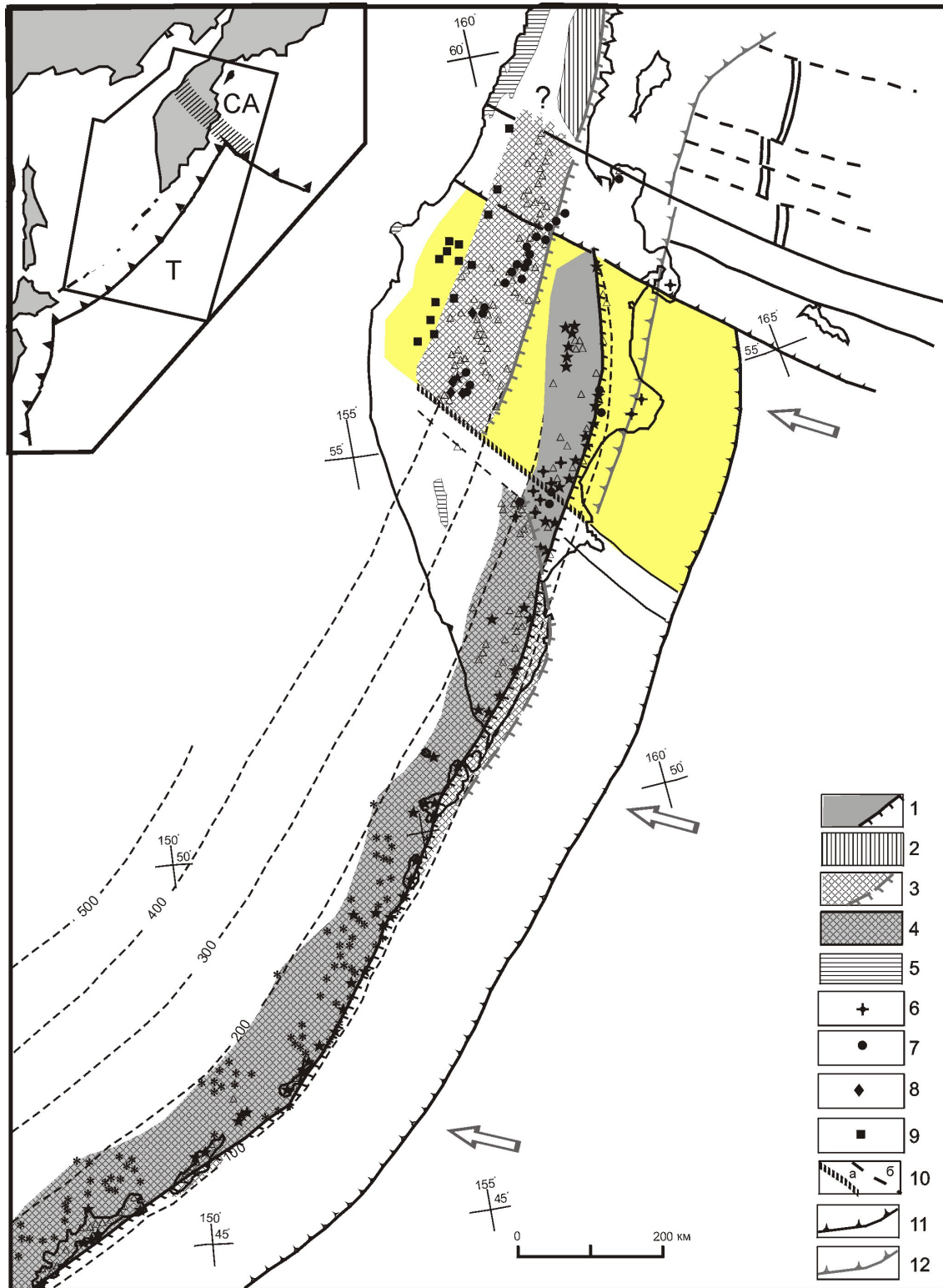


Рис. 1. Тектоническая схема, поясняющая положение NEAB ЛАВ в курило-Камчатской островодужной системе по [2] с дополнениями. 1-4 Вулканические дуги: 1 – Курило – Камчатская (Восточно Камчатская), 2 – Пра-Командорская, 3 – Срединно-Камчатская-Курильская, 4 – Зона наложения курило-Камчатской дуги на Срединно – камчатскую-Курильскую. 5 – Кинкильская. Выходы пород по [35] с дополнениями: 6 – К-На щелочные базальты, 7 – К-На щелочные оливиновые базальты, 9 – щелочные базальты; 10 – разломы. 11 – Курило-Камчатский желоб. 12 – Пра Командорский палеожелоб. Серым тоном показано положение Тихоокеанской плиты под Охотской в зоне перескока. Пояснение в тексте.

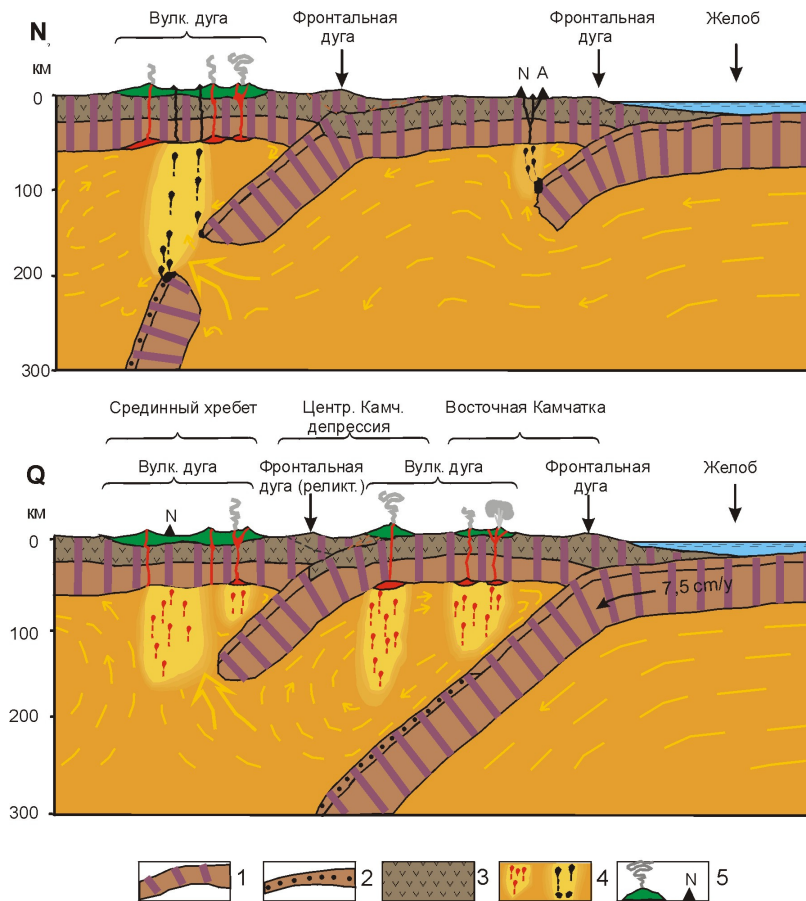


Рис. 2. Разрезы, иллюстрирующие перескок зоны субдукции в конце миоцена и формирование мантийного плюма. По [17] с дополнениями. 1 – Тихоокеанская плита. 2 – океаническая кора, 3 – континентальная кора, 4 – мантия с зонами магнеообразования. 4 – вулканы. Буквы на разрезах: А – адакиты, N – NEAB породы.

Мантийный компонент

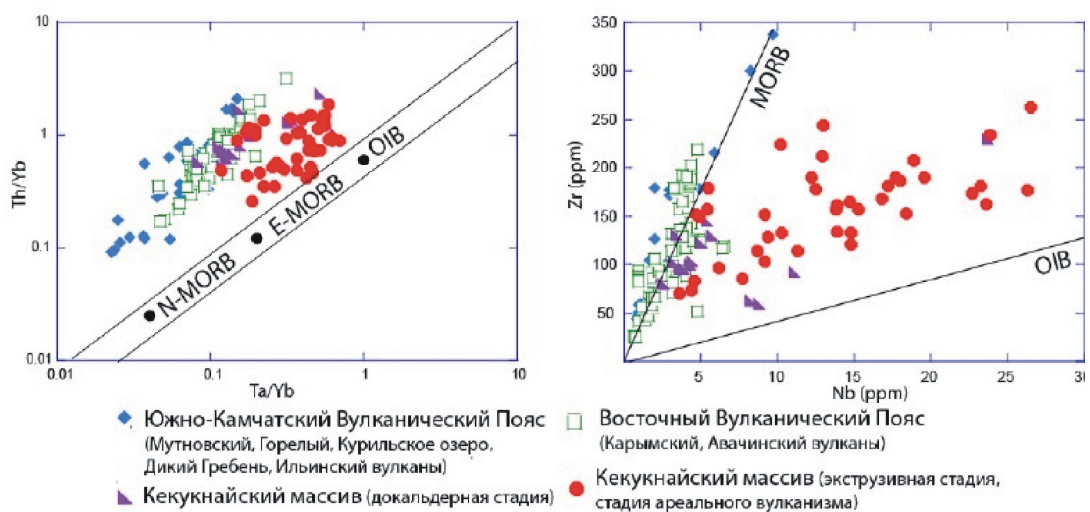


Рис. 3. Диаграммы Thr/Yb-Ta/Yb, Zr-Nb для пород Кекукнайского вулканического массива. Геохимические данные по [8]

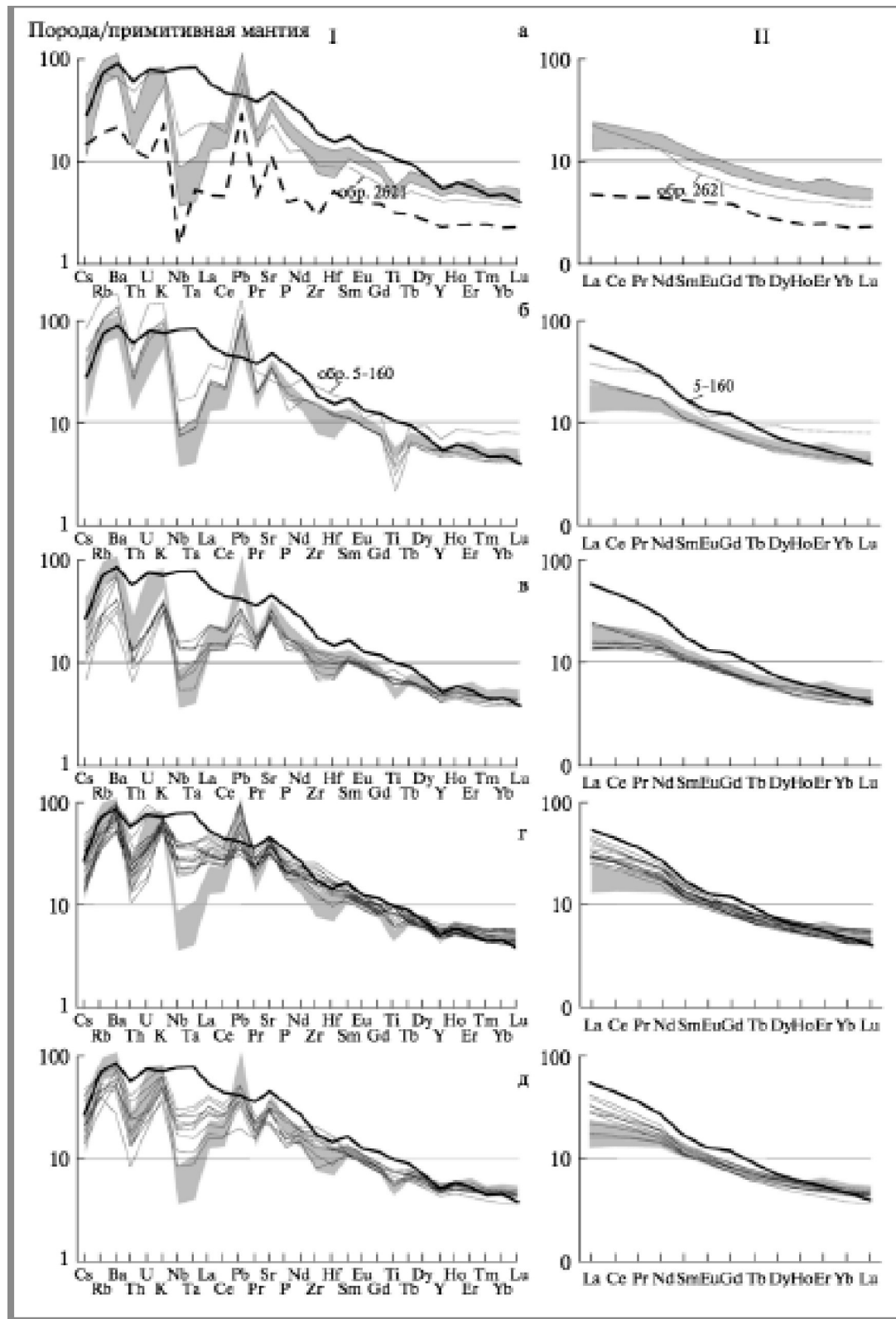


Рис. 4. Эволюционные спайдер-диаграммы (I) и графики нормированного по хондритам содержания редкоземельных элементов (II)? иллюстрирующие вклад мантии в формирование пород Кекукнайского вулканического массива. Использованы данные [8, 31, 33]. Пояснения в тексте.

субдукционный материал продвигается в тыловую зону субдукции по границе верхней и нижней мантий на глубине около 600 км, а затем, в результате мантийного аппвеллинга, поднимается в тыловой зоне, далеко от зоны субдукции. По такому сценарию, по мнению [21], проявляется вулканизм в Йеллоустонской кальдере Северной Америки.

Заключение

Итак, наиболее разработанной является модель взаимодействия адакитового расплава с перидотитом мантийного клина. Он проявляется не только на Западной Камчатке и ВВП, но и на Филиппинах [32], в Северной Америке на вулк. Сан-Хеленс [19], в Центральной Америке при образовании адакитов в субдукционном окне, в Южной Америке при образовании адакитов в фронтальной зоне субдукции, а также в зоне субдукции мелового возраста в Доминиканской республике

Сценарии образования NEAB лав при перескоке зоны субдукции на Камчатке с образованием субдукционного окна на глубине 350–500 км менее достоверны, хотя и подтверждаются данными сейсмической томографии. Это относится как к сценарию плавления ОК на контакте с горячей подсубдукционной мантией, так и формированием мантийного плюма.

О влиянии мантийного плюма на образование NEAB лав речь может идти не о мантийном плюме типа Гавайского, а о мантийных плюмах, формирующихся в пределах верхней мантии на Камчатке — под действием процесса субдукции. Некоторые авторы выделяют 3 типа мантийных плюмов [например, 18], а С. Фассенна с соавторами [21] выделяют ещё 4-й тип, о котором шла речь выше тоже в субдукционной геодинамической обстановке,

Гранты и благодарности

Мы признательны Аиде Александровне Палуевой за всестороннюю помощь в подготовке данной работы. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта ДВО РАН № 12-III-A — 08-063

Список литературы

1. Авдейко Г. П. Геодинамика проявления вулканизма Курильской островной дуги и оценка моделей магмообразования // Геотектоника. 1994, № 2. С. 19–32.
2. Авдейко Г. П., Палуева А. А., Хлебородова О. А. Геодинамические условия вулканизма и магмообразования Курило-Камчатской островодужной системы // Петрология. 2006. Том 14. № 3. С. 248 — 266.
3. Вольнец О. Н., Аношин Г. Н., Антипин В. С. Петрология и геохимия щелочных и субщелочных лав как индикатор геодинамического режима островных дуг // Геология и геофизика. 1986. № 8. С. 10–17.
4. Вольнец О. Н., Карпенко С. Ф., Кэй Р. У., Горринг М. Изотопный состав поздненеогеновых К-На щелочных базальтоидов Восточной Камчатки: отражение гетерогенности мантийного источника магм // Геохимия. 1997. № 10 С. 1005–1018.
5. Заварицкий А. Н. Некоторые факты, которые надо учитывать при тектонических построениях // Известия АН СССР Сер. Геол. 1946. № 2. С. 3–11
6. Колосков А. В. Изотопно-геохимическая неоднородность плиоцен-четвертичных вулканитов Камчатки, геометрия субдукционной зоны, модель флюидно-магматической системы. // Вулканология и сейсмология. 2001. № 6, С. 16–42.
7. Колосков А. В. Проявление вулканизма внутриплитного геохимического типа в островодужной системе и его значение для понимания глубинных процессов геодинамики (на примере Камчатки) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2003. № 2. С. 15–32
8. Колосков А. В., Флёров Г. Б., Перепёлов А. Б. и др. Этапы эволюции Кекукнайского вулканического массива как отображение магматизма тыловой зоны Курило-Камчатской островодужной системы. Часть 1. Геологическое положение и геохимический состав пород. // Вулканология и сейсмология. 2011. № 5. С. 17–41.
9. Колосков А. В., Флёров Г. Б., Перепёлов А. Б. и др. Этапы эволюции Кекукнайского вулканического массива как отображение магматизма тыловой зоны Курило-Камчатской островодужной системы. Часть 2. Петролого-минералогические особенности. Модель петрогенезиса. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 2. С. 63–89.
10. Перепёлов А. Б., Пузанков М. Ю., Иванов А. В., Философова Т. М. Базаниты горы Хухч — первые минералого-геохимические данные по неогеновому К-На щелочному магматизму Западной Камчатки // Доклады Академии Наук. 2006 Том. 408. № 6. С. 795–799.
11. Перепёлов А. Б., Татарников С. А., Павлова Л. А., Ципукова С. С., Демонтерова Е. И. НЕВ-адакитовый вулканизм Центральной Камчатской Депрессии // IV Всероссийский симпозиум по вулканологии и палеовулканологии. Вулканизм и геодинамика. Материалы симпозиума. Петропавловск-Камчатский. 2009. Том. 2. С. 449–454.
12. Пополитов Э. И., Вольнец О. Н. Геохимические особенности четвертичного вулканизма Курило-Камчатской островной дуги и некоторые вопросы петрогенезиса // Новосибирск: Наука. 1981. 182 с.
13. Супруненко О. И., Марковский Б. А. Щелочные вулканы п-ва Кроноцкого (Камчатка) // Докл. АН СССР. 1973. Том. 211. № 3. С. 682–685.
14. Тихомирова С. Р., Бахтеев М. К., Морозов О. А. Натровая щелочно-габброидная формация Восточной Камчатки // Бюл. Моск. об-ва испытателей природы. Отд. геол. 1992. Том. 67. Вып. 4. С. 99–106.
15. Тараканов Р. З. О возможной роли сейсмофокальных зон в формировании и развитии структур островных дуг // Строение сейсмофокальных зон/ Ред. Пущаровский. М: Наука. 1987. С11–26.
16. Arculus R. J., Lapiere H., Jaillard É. Geochemical window into subduction and accretion processes: Raspas metamorphic complex, Ecuador // Geology. 1999. Vol. 2. №. 6. P. 547-550.
17. Avdeiko G. P., Savelyev D. P., Palueva A. A., Popruzhenko S. V. Evolution of the Kurile-Kamchatkan volcanic arcs and dynamics of the Kamchatka-Aleutian junction // Geophysical Monograph 173. Volcanism and subduction: the Kamchatka region. (J. Eichelberger, E.

- Gordeev et al. Editors). American Geophysical Union. Washington D. C., 2007. P. 41–60.
18. *Courtillot V., Davaille A., Besse J., Stock J.* Three distinct types of the Earth's mantle // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2003. Vol. 205. P. 295–308.
 19. *Defant M. J., Drummond M. S.* Mount St. Helens: Potential example of the partial melting of the subducted lithosphere in a volcanic arc // *Geology.* 1993. Vol. 21. P. 547–550.
 20. *Delany Y. M., Helgeson H. C.* Calculation of the thermodynamic consequences of hydration of subduction oceanic crust to 100 kbar at 800° C // *Amer. J. Sci.* 1978. Vol. 278. № 5. P. 638–686.
 21. *Faccenna C., Becker Th. W., Lallemand S., Lagabriele Y., Funicello F., Piromallo C.* Subduction-triggered magmatic pulses: A new class of plumes? // *Earth and Planetary Science Letters.* 2010. Vol. 299. Iss. 1–2. P. 54–68.
 22. *Gorbatov, Widiyantoro, S., Fukao Y. and E. Gordeev.* Signature of remnant slabs in the North Pacific from P-wave tomography // *Geophys J. Int.* 142. P. 27–36.
 23. *Gill J. B.* Orogenic andesites and plate tectonics. New-York: Springer-Verlag, 1981. 390 p
 24. *Hastie A. R., Mitchell S. F., Kerr A. C., Minifie M. J., Millar I. L.* Geochemistry of rare high-Nb basalt lavas: Are they derived from a mantle wedge metasomatised by slab melts? // *Geochimica et Cosmochimica Acta.* 2011. Vol. 75. P. 5049–5072.
 25. *Hirano N., Takahashi E., Yamamoto J., Abe N., Ingle S. P., Kaneona I., Hirata T., Kimura J.-I., Ishii T., Ogawa Y., Machida A., Suyehiro K.* Volcanism in Response to Plate Flexure // *Science.* 2006. Vol. 313. P. 1426–1428.
 26. *Honda S., Uyeda S.* Thermal process in subduction zones – a review and preliminary on the origin of arc volcanism // *Arc volcanism: physics and tectonics.* Tokio: TERRAPUB, 1983. P. 117–140.
 27. *Hsui A. T., Toksoz M. N.* The evolution of thermal structure beneath a subduction zone // *Tectonophysics.* 1979. V. 60. № 43–60.
 28. *Kepezhinskas P., Defant M. J., and Drummond M. S.* Progressive eQuaternary convergent margin tectonics of Costa Rica, segmentation of the Cocos Plate, and Central American volcanism Enrichment of island arc mantle by melt-peridotite interaction inferred from Kamchatka xenoliths // *Geochimica et Cosmochimica Acta.* 1996. Vol. 60. № 7. P. 1217–1229.
 29. *McCulloch M. T., Gamble J. A.* Geochemical and geodynamical constraints of subduction zone magmatism // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 1991. Vol. 102. № 3/4. P. 358–374.
 30. *Münker C., Wörner G., Yogodzinski G., Churikova T.* Behaviour of high field strength elements in subduction zones: constraints from Kamchatka-Aleutian arc lavas // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2004. Vol. 224. P. 275–293.
 31. *Pearce J. A. and Parkinson I. J.* Trace element model for mantle melting; application to volcanic arc petrogenesis // *Magmatic Process and Plate Tectonics.* Geological Society, London, Special Publications 76. P. 373–403.
 32. *Sajona F. G., Maurv R. C., Bellon H. et al.* High Field Strength Element Enrichment of Pliocene-Pleistocene Island Arc Basalts, Zamboanga Peninsula, Western Mindanao (Philippines) // *Journal of petrology.* 1996. Vol. 37. № 3. P. 693–726.
 33. *Sun S. S. and McDonough W. F.* Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // *Magmatism in the Ocean Basins.* Geological Society, London, Special Publications 42, P. 313–345.
 34. *Tatsumi Y., Hamilton D. L., Nesbitt R. W.* Chemical characteristics of fluid phase released from a subducted lithosphere and origin of arc magmas: evidence from high-pressure experiments and natural rocks // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 1986. Vol. 29. P. 293–309.
 35. *Volynets O. N.* Geochemical types, petrology and genesis of Late Cenozoic volcanic rocks from the Kurile-Kamchatka island-arc system // *Intern. Geol. Rev.* 1994. Vol. 36. P. 373–405.
 36. *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.