

УДК 551.2.03: 551.24

## СВЯЗЬ ТЕКТОНИЧЕСКОГО ПОЛОЖЕНИЯ И ГЕОХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВУЛКАНИЧЕСКИХ ПОРОД ЧЕТВЕРТИЧНОГО ВОЗРАСТА КУРИЛЬСКОЙ ОСТРОВНОЙ ДУГИ

**Бергаль-Кувикас О.В.**

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН*

*Научный руководитель: д. г.-м. н., проф. Г.П. Авдейко*

С целью изучения пространственного проявления вулканизма в пределах Курильской островной дуги (КОД) был проведен детальный подсчет объемов всех наземных четвертичных и подводных вулканов. Так же для выявления особенностей генезиса магм был выполнен анализ геохимических показателей вулканитов вдоль и вкрест дуги. Сопоставление полученных результатов с опубликованными данными геофизических и геохимических исследований позволили выделить факторы, влияющие на особенности магмогенезиса в пределах дуги.

*Ключевые слова: Курильская островная дуга, магматизм, субдукционное окно*

### ВВЕДЕНИЕ

Курильская островная дуга (КОД) является одним из звеньев Курило-Камчатской островодужной системы и входит в Тихоокеанское Огненное Кольцо (рис. 1). Несмотря на многочисленные исследования данного региона, особенности магмогенезиса и пространственного проявления вулканизма данной дуги остаются ещё мало изученными. Цель настоящей работы заключается в систематизации всех имеющихся геохимических результатов исследований и данных по пространственно-тектоническим характеристикам разных геохимических типов вулканитов. Важно отметить, что полученные результаты исследований будут важны для дальнейшего понимания природы и особенностей проявления магматизма в активной континентальной окраине.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализ литературных источников [4, 8, 9] позволил изучить пространственно-временную активность вулканических центров в изучаемом районе. Данные по объемам подводных вулканов были приведены на сайте

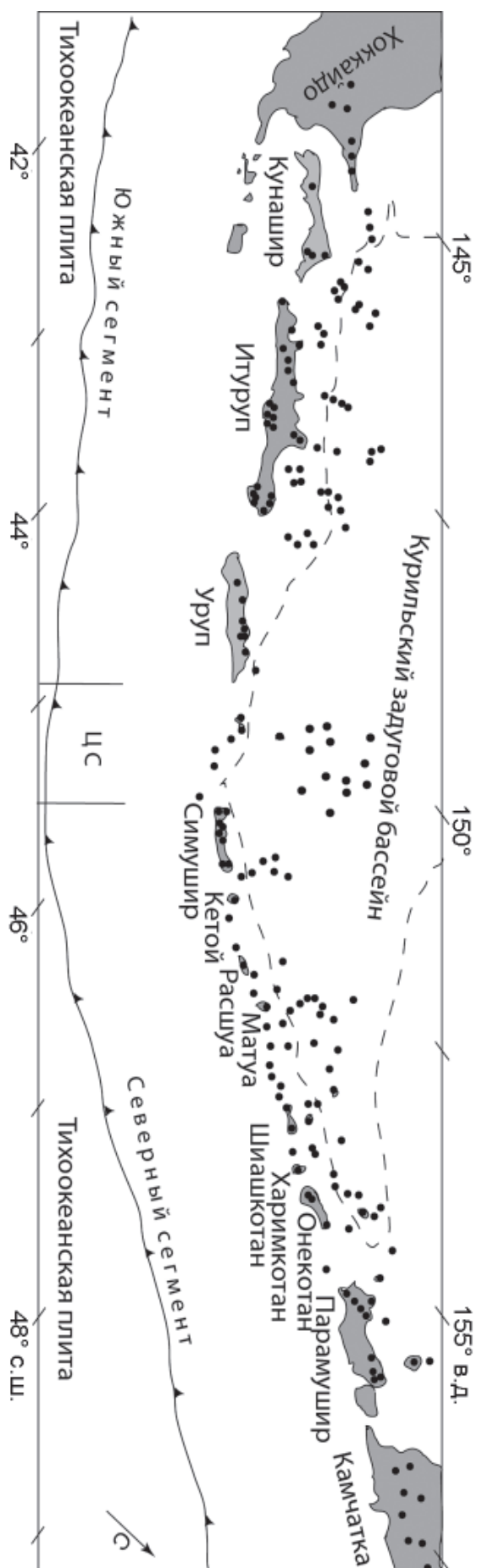


Рис. 1. Обзорная схема структурного положения вулканов КОД. Точками показаны четвертичные вулканы.

данных лаборатории подводного вулканизма ИВиС ДВО РАН [18]. В работе Мелекесцева и Пономаревой [8] опубликованы объемы современных, активных вулканов и продуктов голоценовых извержений. В программе Excel были построены графики распределения объемов вулканизма в зависимости от нахождения относительно желоба и вариации объемов вдоль КОД. Основная техническая часть работы в виде сбора информации о геохимическом составе вулканитов КОД была выполнена в программе Excel. Для построения графиков использовалась программа KaleidaGraph. Доработка иллюстрации производилась в программе Adobe Illustrator.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

### *Особенности пространственного проявления вулканизма*

На основе опубликованных материалов геохимических и геофизических исследований и результатах, полученных непосредственно автором исследования, была составлена база данных, включающая в себя сведения об объемах вулканитов всех надводных и подводных вулканов исследуемого района [3]. Были определены численные значения ширины вулканического пояса и вулканических зон вкост дуги для всех трех сегментов КОД. Полученные данные коррелируются с сейсмическими данными о различных углах наклона погружающейся плиты [14, 15].

Традиционно КОД разделяют на три сегмента: Южный, Центральный и Северный (рис. 1). Выделенные блоки различаются по мощности коры, расстоянию до сейсмофокальной зоны и по ряду геохимических признаков [1, 10, 14, 15]. Границы между выделенными сегментами весьма условны. Северный сегмент (СС) включает в себя вулканы, расположенные приблизительно с 51° с.ш. по 46.83° с.ш.. К данному сегменту относятся Парамуширская группа вулканов, поперечная зона Маканруши, Чиринкотанская группа вулканов, Расшуа и Кетой, вулканы острова Симушир. Группы вулканов согласно монографии по подводному вулканизму КОД [1]. Центральный сегмент (ЦС) представлен, глав-

ным образом, подводными вулканами поперечной зоны Броутона и вулканами островов Чирпой и Броутона. Северная и Южная Итурупская группа вулканов и вулканы острова Кунашир входят в Южный Сегмент (ЮС) КОД, который расположен приблизительно в пределах  $46.14^{\circ}$  с.ш. –  $43.5^{\circ}$  с.ш..

Для СС и ЮС характерно максимальное количество вулканов и суммарное значение объемов во фронтальной зоне с постепенным убыванием данных показателей к тылу дуги (рис. 2). Вариации объемов вулканизма вдоль КОД демонстрируют, что максимальные их значения характерны для ЦС (рис. 3). Интенсивный процесс растяжения контролирует здесь наличие крупных кальде-рообразующих структур. Глубинное сейсмическое зондирование и данные сейсмической томографии свидетельствуют о неоднородности субдуцирующей плиты в пределах ЦС, ее растяжении и разрывных нарушениях, сопровождающимся астеносферным апвеллингом [12, 17].

#### *Геохимическая зональность вдоль и вкrest дуги*

Изотопный состав вулканитов ЦС КОД характеризуется повышенными значениями  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  и меньшими значениями  $^{86}\text{Sr}/^{87}\text{Sr}$ , что можно охарактеризовать как обогащение мантийного источника по сравнению с другими сегментами КОД (рис. 4, 6). Наиболее дифференцированные ассимилированные магмы типичны для Северной части Хоккайдо (СХ) и Южной Камчатки (ЮК) об этом свидетельствуют широкие диапазоны вариации по изотопам стронция и низкие соотношения изотопов неодима. Интересно отметить, что большая мощность коры соответствует более дифференцированным магмам, так мощность коры на СХ составляет 32–34 км, на ЮК и СК 32–36 км и всего лишь 23–30 км на ЦС [5].

Геохимическая зональность вдоль дуги по редким немобильным элементам (Nb, Zr, Y, Yb) свидетельствует о неоднородности составов магм: пониженных значениях Y, Yb, Zr, повышенные значения Nb характерны для ЦС, для СС также характерно несколько повышенные значения Nb, Zr (Рис. 5, 6).

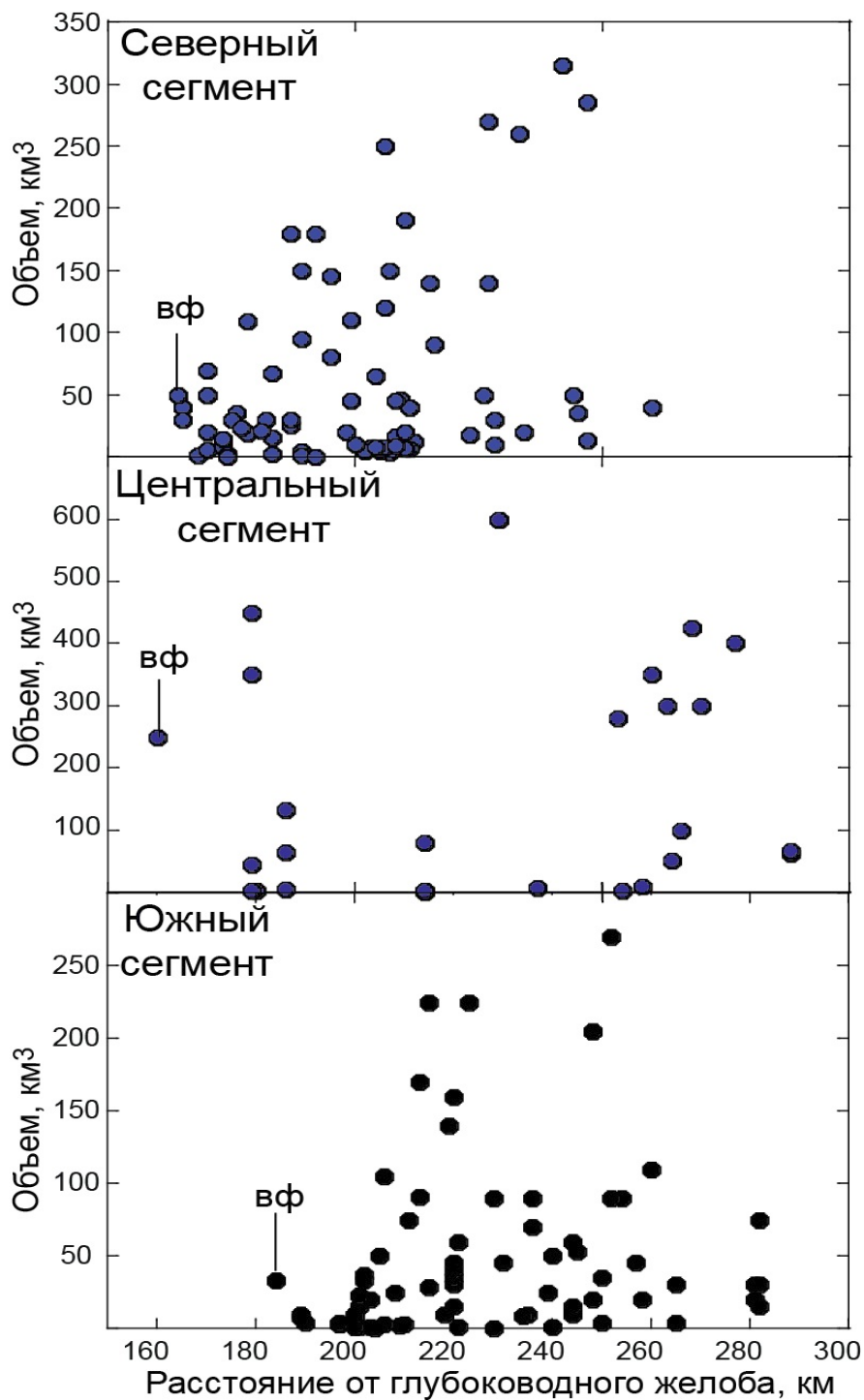


Рис. 2. Графики зависимости объемов вулканического материала от расстояния до глубоководного желоба (вкrest дуги). ВФ – вулканический фронт.

Закономерности вариации составов вкrest дуги проявляются в увеличении содержания одних элементов от фронта к тылу дуги, например Nb, и относительно постоянном поведении, не зависящим от слэба, других элементов, например Y, Yb, Zr (Рис. 7).

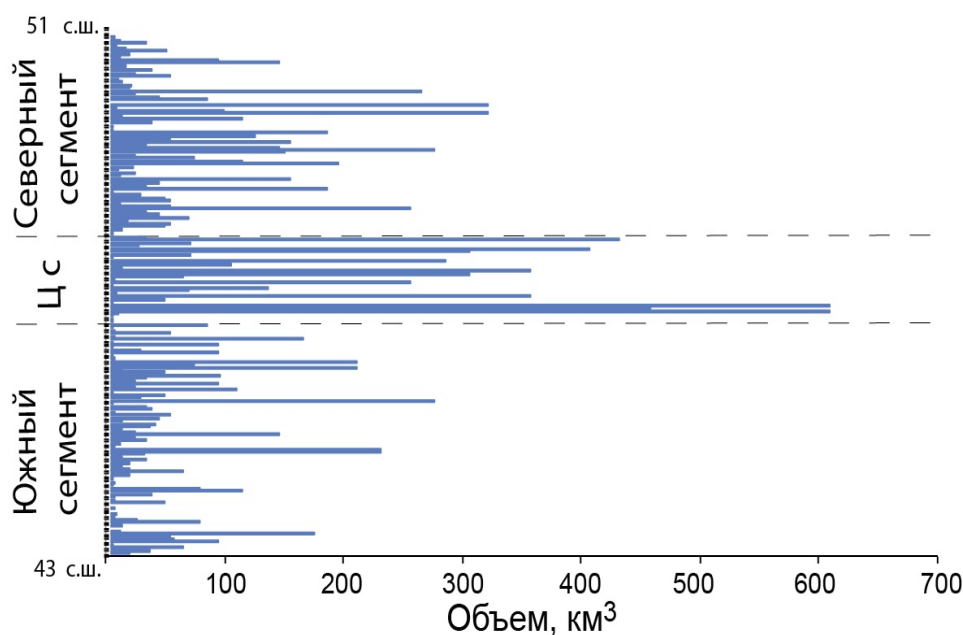


Рис. 3. Вариации объемов вулканического материала вдоль КОД. ЦС – Центральный сегмент.

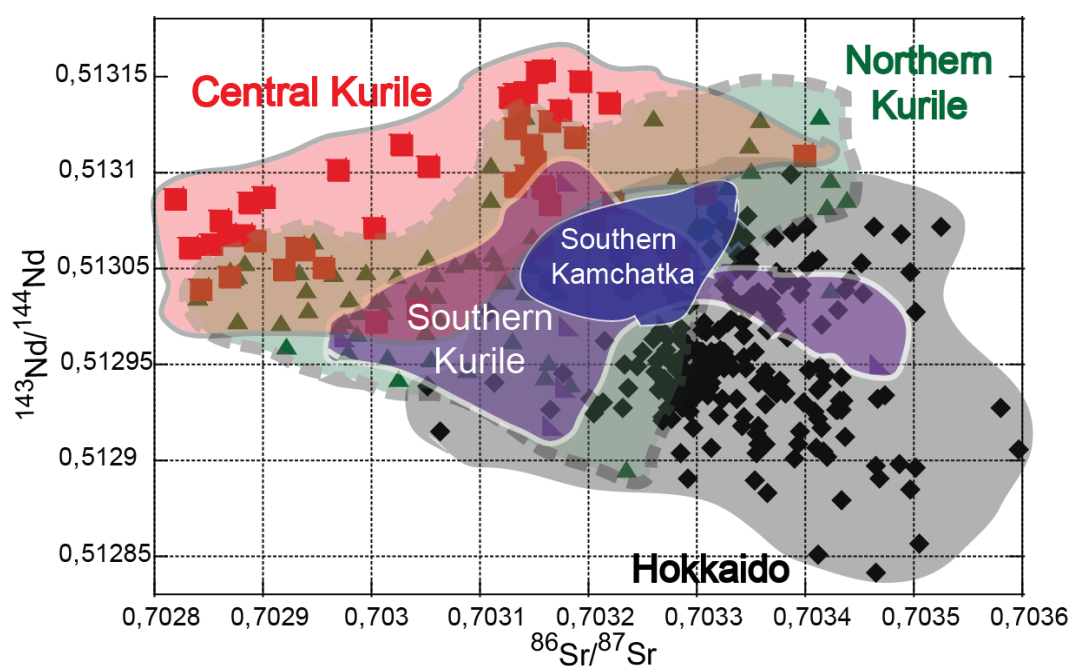


Рис. 4. Изотопный состав вулкаников КОД. По данным [3, 6, 7, 11, 13].

#### *Генезис родоначальных, первичных магм*

В изучаемом регионе вулканики имеют состав от базальтов до риолитов. С целью исключения влияния процессов фракционной дифференциации и ассимиляции в дискуссии о магмогенезисе использовались составы более основных, первичных магм ( $< 55\% \text{ SiO}_2$ ).

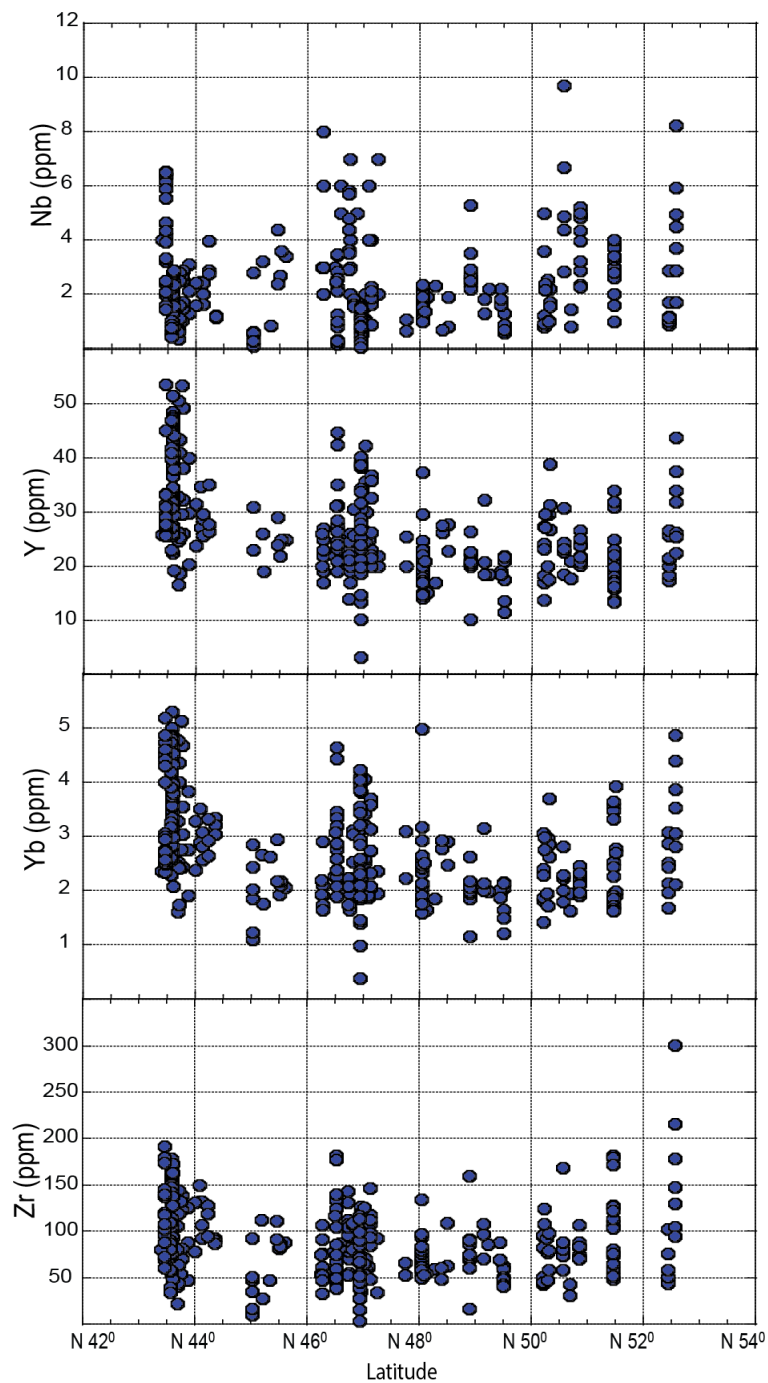


Рис. 5. Вариации флюид-немобильных элементов вдоль КОД.

### 1. Мантийный источник

Соотношения флюид-немобильных элементов, не зависящих от процессов субдукции, являются доказательствами действия обогащения или истощения мантийного источника. Сравнение составов вулканитов КОД с N-MORB (Normal Mid Ocean Ridge Basalt), E-MORB (Enriched Mid Ocean Ridge Basalt), OIB (Oceanic Island Basalt) свидетельствуют о гетерогенном мантийном источ-

нике вдоль всей дуги (рис. 12), что подтверждается и более ранними публикациями [1, 9, 11]. Впервые автором данной работы удалось обнаружить явное обогащение составов вулканитов для СС и ЦС, высокие концентрации ниобия и циркона подтверждают это (рис. 7).

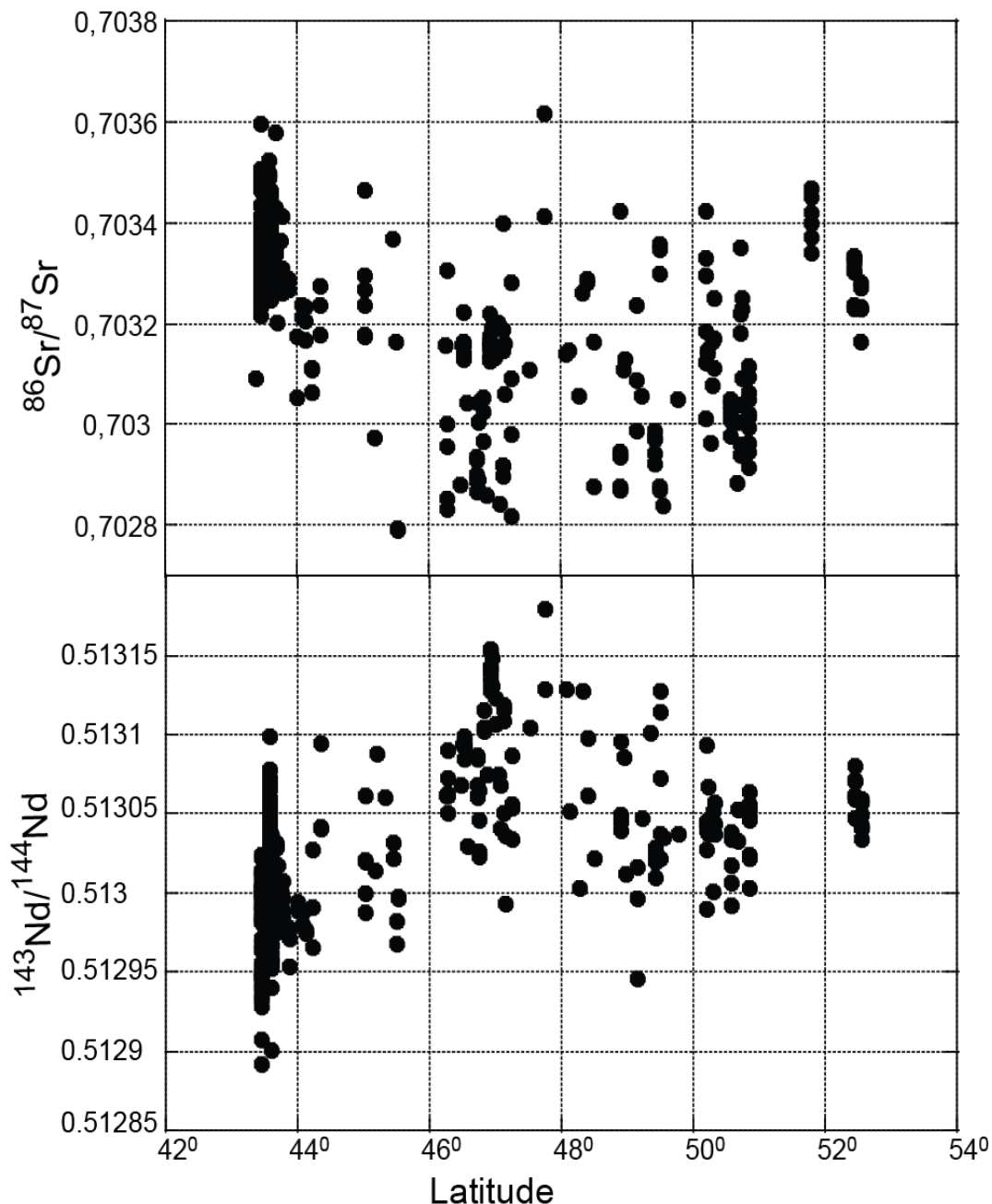


Рис.6. Вариации изотопов вдоль КОД.

По данным вариации изотопного состава вдоль дуги явно обогащенный мантийный источник находится в ЦС КОД об этом свидетельствуют низкие соотношения изотопов  $^{86}\text{Sr}/^{87}\text{Sr}$  и повышенные значения изотопов  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$

(рис. 4, 6). На нетипичность магматизма в центральном секторе КОД указывает также пониженные значения Y, Yb и несколько повышенные значения Nb (рис. 5).

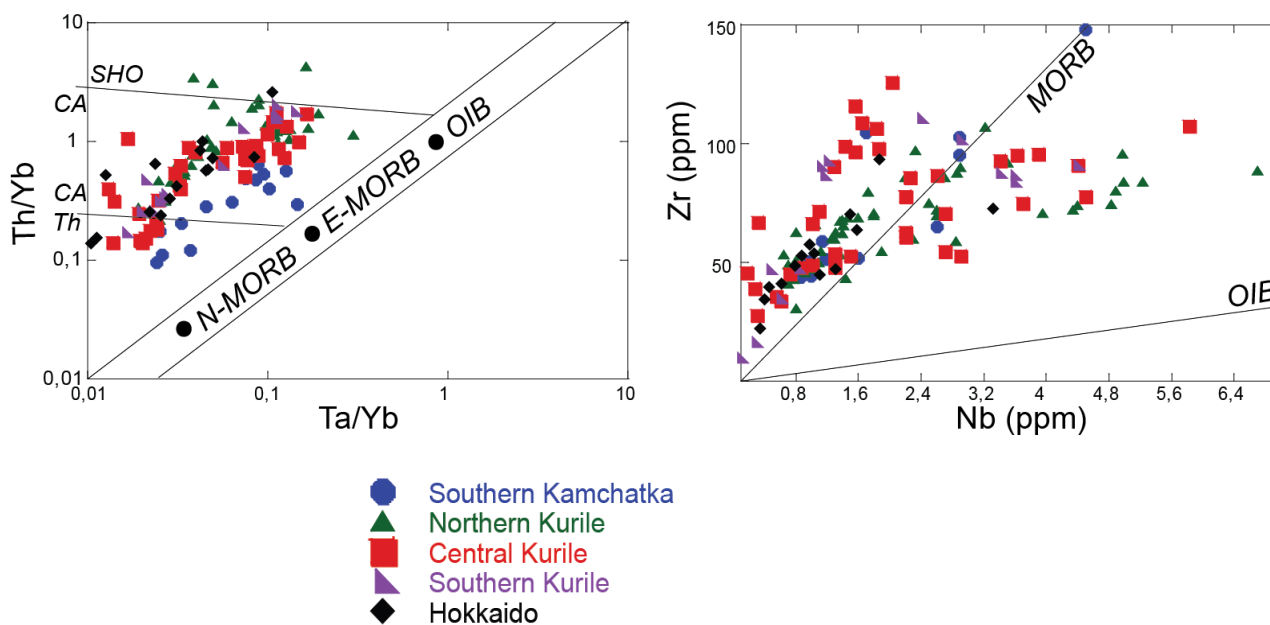


Рис. 7. Соотношение флюид-немобильных элементов ( $\text{SiO}_2 < 55\%$ ). N-MORB – Normal Mid Oceanic Ridge Basalt, E-MORB – Enriched Mid oceanic Basalt, OIB – Oceanic Island Basalt, SH - шошониты, CA - известково-щелочные, TH - толеиты.

## 2 Субдукционный компонент

Соотношения флюид-мобильных элементов (Cs, Ba, U, Th, Sr), легко транспортируемых с дегидратированным флюидом, и флюид-немобильных элементов (Nd, Hf, Yb), зависящих от плавления осадков, свидетельствуют о вкладе субдукционных компонентов в магмогенезис. Сравнительно высокие соотношения Ba/Th, Ba/Nb, U/Th типичны для СХ и ЮК и напротив высокие соотношения Th/Nd, Th/Yb характерны в большей степени для СС КОД (рис. 8). Однако при более детальном изучении полученных данных можно увидеть что каждый сектор имеет два тренда вариации, один с высокими концентрациями флюид-мобильных элементов, второй с флюид-немобильными элементами – это говорит о том что скорее всего процессы дегидратации и плавления осадков идут на всем участке дуги, просто в разных пропорциях и объемах (рис. 8).

С целью изучения источника повышенных значений Nb и Zr в магмах СС и ЦС КОД были проведены дополнительные исследования, заключающиеся в проверке гипотезы плавления субдуцирующей коры или астеносферного аппвельинга. Соотношения флюид-мобильных элементов к флюид-немобильным элементам (Nb/Y, Rb/Y, Nb/Zr) свидетельствуют об обогащении флюидом дегидратированной коры магм СХ и СС и напротив магмы ЮК, СС и ЦС КОД имеют явный дополнительный источник обогащенной мантии, возможно связанного с плавлением слэба (рис. 9). Классическая диаграмма Sr/Y к Y демонстрирует, что магмы СС имеют характеристики адакитов, вулканиты ЮК находятся на границе между классическими адакитами и островодужными магмами. Для сравнения классических, дискриминационных характеристик адакитов с вулканитами СС была проведена работа, иллюстрирующая типичные характеристики адакитов и данные геохимического состава СС (табл. 1). Полученные

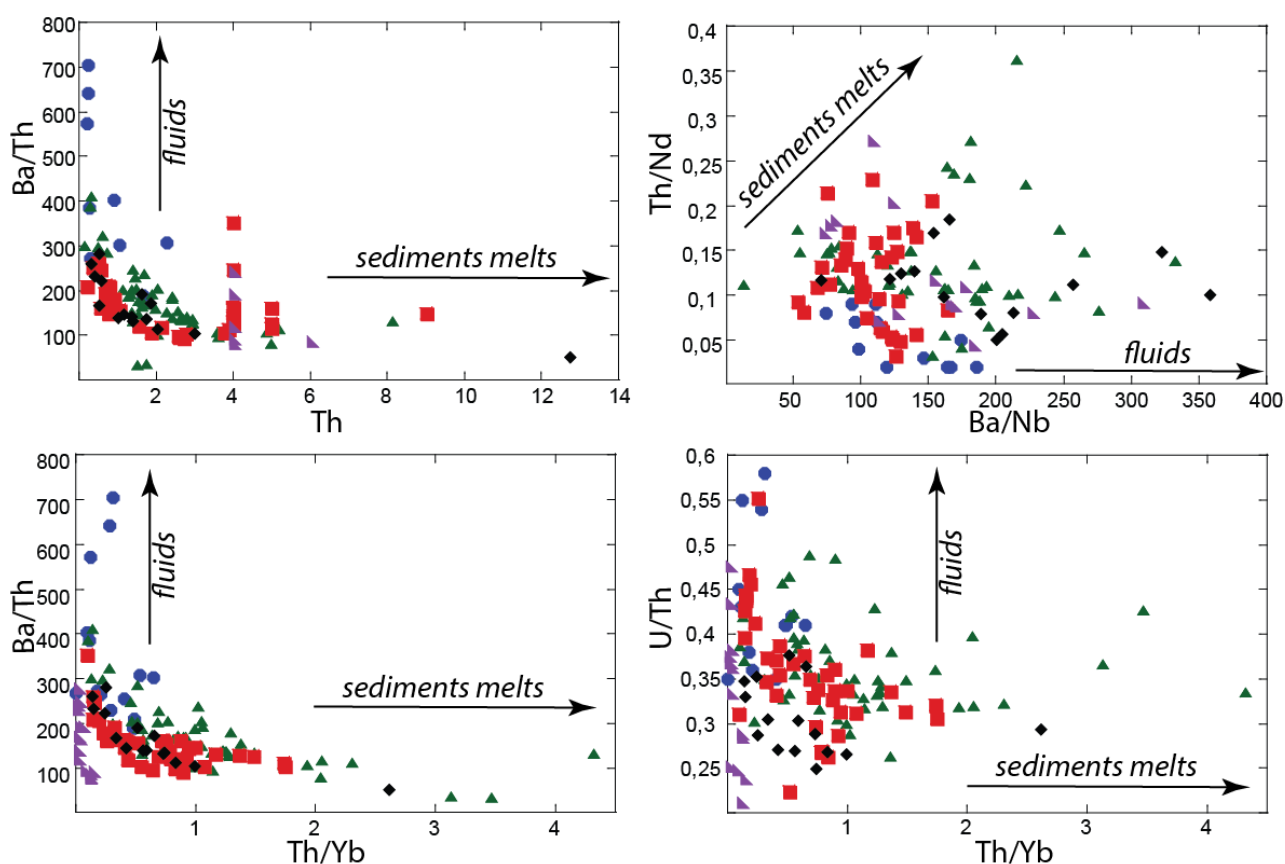


Рис. 8. Соотношение флюид-мобильных элементов к флюид-немобильным ( $\text{SiO}_2 < 55\%$ ). Fluids - флюиды, sediments melts – плавление осадков. Условные обозначения на рис. 7.

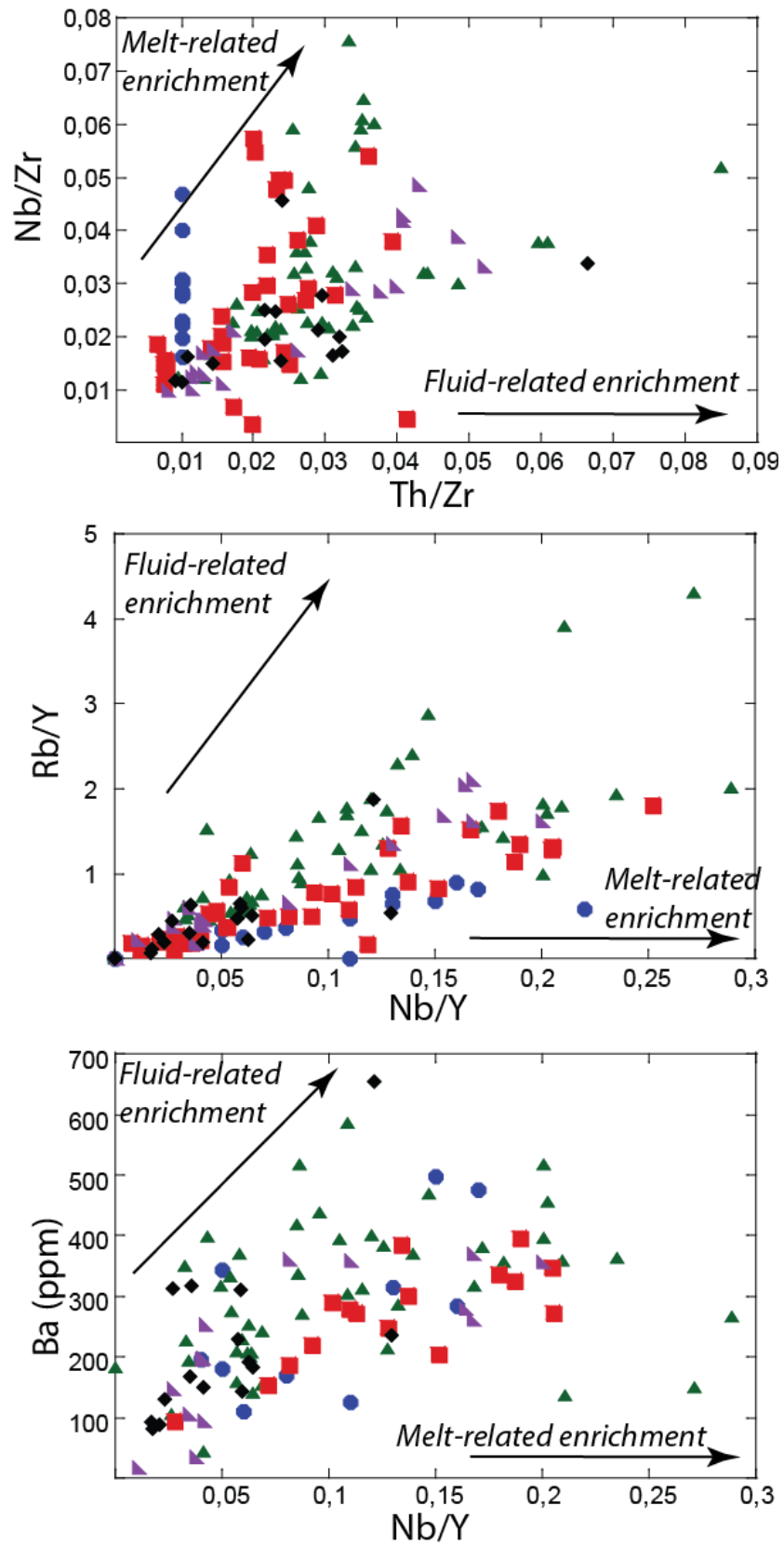


Рис. 9. Соотношение флюид-мобильных элементов к флюид-немобильным ( $\text{SiO}_2 < 55\%$ ), показывающее обогащение мантийного источника флюидом (fluid-related enrichment) либо плавлением (melt-related enrichment). Условные обозначения на рис. 7.

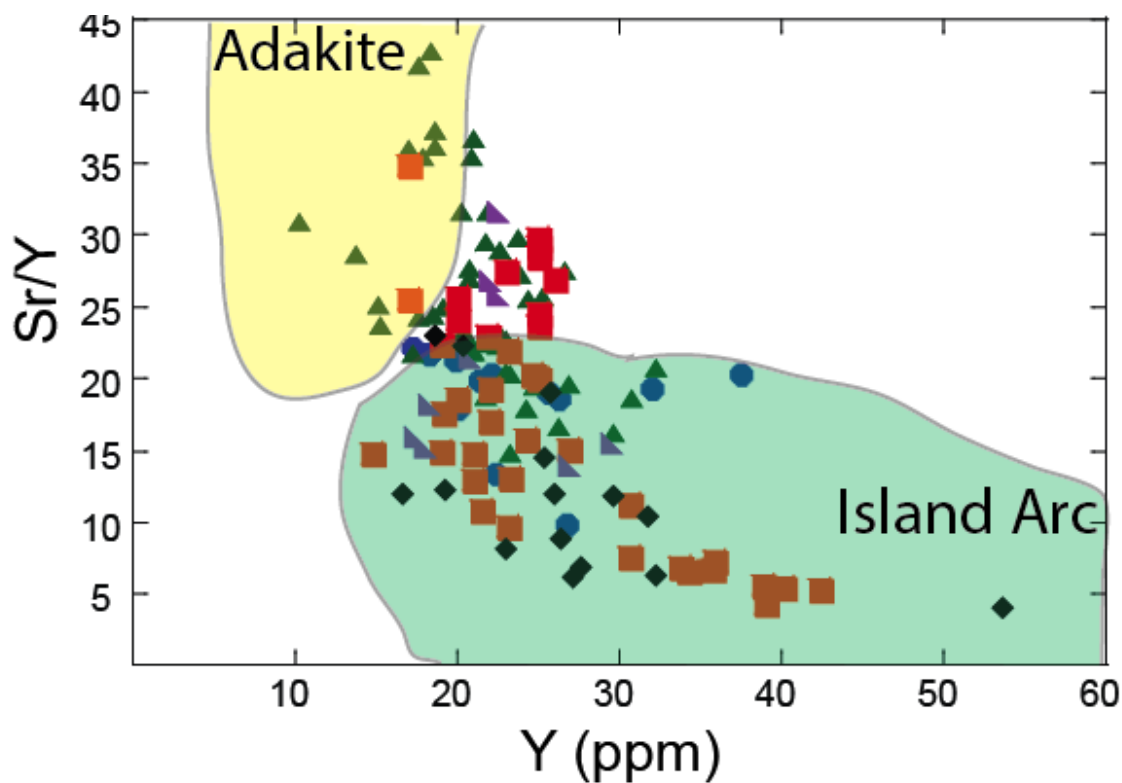


Рис. 10. Диаграмма зависимости Sr/Y к Y, дискриминационные поля адакитов и островодужных лав. Условные обозначения на рис. 7.

Табл. 1. Сравнение геохимических характеристик адакитов с вулканитами СС КОД.

Адакиты	Северные Курилы
SiO <sub>2</sub> ≥56 wt. %	SiO <sub>2</sub> 45–64 wt. %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ≥15 wt. %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 16–22 wt. %
MgO <3 wt. %	MgO 1.8–9 wt. %
Sr ≥400 ppm	Sr 300–820 ppm
Y ≤18 ppm,	Y 11–39 ppm,
Yb ≤1.9 ppm,	Yb 0.15–0.65 ppm,
Ni ≥20 ppm,	Ni 2.81–124.91 ppm,
Cr ≥30 ppm,	Cr 2.36–248.57 ppm,
Sr/Y ≥20,	Sr/Y 15–44,
<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr ≤0.7045	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr 0.7029–0.7034

данные свидетельствуют, что вулканы СС имеют схожий диапазон вариаций с адакитами и могут быть отнесены к породам образованным при процессе плавления слэба (рис. 10, табл. 1). ЦС КОД имеет повышенные значения Nb, но отличаются от СС изотопными составами. С целью определения различия в генезисе магм были построены диаграммы Nb/Ta к Sr/Y и Zr/Hf к Sr/Y (рис. 10). Так как соотношения Nb/Ta, Zr/Hf зависят главным образом от обогащенности мантии глубинными источниками, а Sr/Y свидетельствует об плавлении слэба, мы можем предположить, что вулканы ЦК образовались за счет мантийного апвеллинга обогащенной мантии (повышенные значения Nb/Ta, Zr/Hf), в отличие от магмы СС имеют характеристики сильного влияния субдукционных компонентов (дегидратация плиты, плавление осадков и плавление базальтов слэба).

#### *Модель магмогенезиса КОД*

С целью изучения пространственного проявления вулканизма в пределах КОД был проведен детальный подсчет объемов всех наземных четвертичных и подводных вулканов [1]. Были выделены сегменты КОД, отличающиеся по целому ряду характеристик. Удалось проследить определенную тенденцию зависимости объёмов продуктов вулканизма от расстояний до глубоководного желоба. Так, для СС и ЮС КОД четко прослеживаются два тренда вариации: первый тренд характеризуется относительно одинаковыми объемами вулканитов вне зависимости от расстояния до глубоководного желоба, второй тренд демонстрирует увеличения объемов от фронтальной части до тыловой зоны (рис. 2). Полученные данные позволяют предположить, что существует два различных источника контролирующих объемы магмообразования. Первый источник не проявляет зависимости от субдуцирующей плиты, поскольку объемы вулканизма никак не связаны с расстоянием до глубоководного желоба и имеют приблизительно равные значения. Второй источник явно подчиняется действию погружающейся плиты, причем более объемные вулканические сооружения находятся в тыловой зоне, на расстоянии более чем 250 км от желоба. Для ЦС КОД зависи-

мость объемов вулканизма от расстояний до желоба не прослеживается. Однако максимальные объемы вулканитов характерны именно для этой зоны (рис. 3).

Изотопный состав вулканитов ЦС КОД характеризуется повышенными значениями  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  и меньшими значениями  $^{86}\text{Sr}/^{87}\text{Sr}$ , что можно охарактеризовать как обогащение мантийного источника по сравнению с другими секторами КОД (рис. 6). Сравнительный анализ вулканитов КОД с другими субдукционными системами Тихого океана свидетельствует что ЦК имеют близкий состав

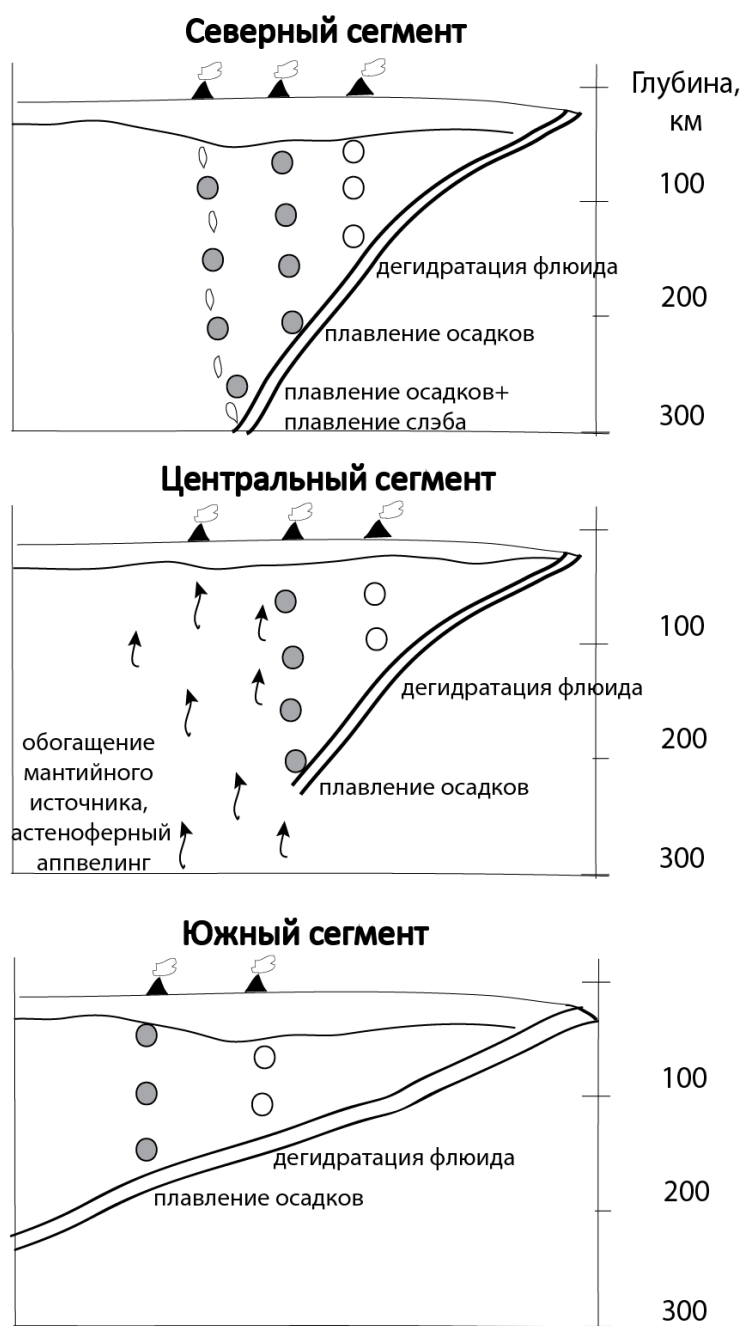


Рис. 11. Модель магмообразования КОД.

с адакитами и NEB (Nb-enriched basalts) лавами (рис. 10). В данном случае, изотопные характеристики являются одним из признаков нетипичного субдукционного магматизма. Соотношения редких флюид-немобильных элементов также подтверждают гетерогенность мантийного источника вдоль КОД.

Анализ геохимических данных КОД свидетельствует о том, что для ЮК, СС, ЮС и СХ характерна типичная субдукционная зональность изменения состава вулканитов вкрест дуги. Фронтальная зона формируется, главным образом, за счет флюидов из дегидратированной океанической плиты. Процесс плавления субдукционного осадка типичен для промежуточной и тыловой зон КОД. Вулканы СС КОД характеризуются адакитовыми характеристиками, это говорит о том что в данном сегменте происходит не только плавление субдуцирующего осадка, но и плавление базальтов субдуцирующей плиты. Таким образом, возможно, что увеличение объемов вулканизма вкрест дуги связано с действием субдукционных компонентов. Наибольшие объемы вулканизма типичны для ЦС КОД, для него же характерен наиболее обогащенный мантийный источник.

В работе Тхоркедсона с соавторами [16] при анализе вулканизма вдоль активной континентальной окраины Северной Америки выделяют наличие внутриплитных лав, тонкую литосферу, увеличенные объемы магматизма, низкоскоростные аномалии и высокий тепловой поток как классификационные признаки субдукционного окна.

По данным глубинного сейсмического зондирования, в ЦС находится крупная разрывная зона вдоль которой в историческое время неоднократно происходили сильные землетрясения, в том числе в 2006 и 2007 годах [5, 17]. Важно отметить приуроченность астеносферного аппвельинга к ЦС КОД [12].

## ВЫВОДЫ

Анализ пространственного проявления вулканизма, особенности геохимических вариации и данные геофизических исследований позволяют предположить следующее:

1. Мантийный источник вдоль КОД гетерогенный. Обогащенный мантия соответствует ЦС КОД. На нетипичность субдукционного вулканизма в данном сегменте также указывают соотношения редких немобильных элементов. Геофизические данные свидетельствуют о крупном разрывном нарушении, сопровождающимся мантийным апвеллингом. Все эти результаты исследований подтверждают наличие субдукционного окна в ЦС КОД.

2. Влияние субдукционного компонента типично для всех сегментов КОД. Вкрест дуги наблюдается зональность геохимического состава, выраженная в влиянии дегидратированного флюида для фронтальных вулканов, и плавлении осадков для тыловых вулканов. Объемы и пропорции субдукционного компонента вдоль КОД различны и, возможно, зависят от угла наклона слэба.

3. Вулканы СС КОД имеют адакитовые характеристики, это свидетельствует о начале плавления слэба. Наличие крупной термальной аномалии на ЮК и в СС КОД, подтверждает повышенные температуры в мантийном клине, возможно этих температур достаточно для начала плавления слэба. Особенности пространственного проявления вулканизма свидетельствуют что угол наклона субдуцирующей плиты больше в СС КОД, по сравнению с другими сегментами. Это говорит о том что, температура в мантийном клине выше чем в других сегментах КОД и, возможно, ее достаточно для начала плавления слэба.

4. Очевидно, что особенности тектонического строения зоны субдукции контролируют проявление магматизма в пределах КОД. Большой угол наклона слэба в СС влияет на большой вклад субдукционного компонента в магмогенезис, на проявление адакитовых характеристик и большие объемы вулканизма вкрест дуги. Вулканы ЦС образовались на границей между плитами с разными углами наклона слэба. Повышенные объемы вулканизма, нетипичность субдукционного вулканизма, наличие астеносферного аппвеллинга указывают на субдукционное окно в данном сегменте. ЮС и СХ характеризуется меньшим углом наклона слэба, влияние субдукционного компонента ярко выражено, оно прояв-

ляется в влиянии дегидратации флюида в большей степени и начале плавления осадков.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов ДВО РАН 13-III-B-08-194, РФФИ 12-05-31362.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Авдейко Г.П., Антонов А.Ю., Волинец и др.* Подводный вулканизм и зональность Курильской островной дуги. Москва: Наука, 1992. 528 с.
2. *Бергаль-Кувикас О.В.* Особенности пространственного проявления вулканизма Парамуширской группы, Курильская Островная Дуга // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2012. № 2. Выпуск 20. С. 231-244.
3. *Бергаль-Кувикас О.В.* Объемы четвертичных вулканитов Курильской островной дуги: анализ пространственного расположения и связь с зоной субдукции // Тихоокеанская геология. № 2. Выпуск 34. С. 103-116.
4. *Гущенко И.И.* Закономерности размещения центров вулканической активности по земному шару // Вулканология и сейсмология. 1983. № 6. С. 10-30.
5. *Злобин Т.К., Пискунов В.Н., Фролова Т.И.* Новые данные о строении земной коры центральной части Курильской Островной Дуги // Доклады Академии Наук СССР. 1987. № 293. С.185-188.
6. *Кувикас О.В., Накагава М., Авдейко Г.П.* Особенности поперечной зональности вулканических пород Северной части Курильской Островной Дуги, оценка вклада субдукционных компонентов в магмообразование. Тезисы конференции современные проблемы магматизма и метаморфизма. г. Санкт-Петербург. 2012. С. 318-319.
7. *Мартынов Ю.А., Рыбина А.В., Дриль С.И., Мартынов А.Ю.* Зоны аномального вулканизма Курильских островов, остров Парамушир // Вестник ДВО РАН. 2009. № 4. С. 17-23.
8. *Мелекесцев И.В., Пономарева В.В.* Новейший (N22 - Q4) наземный и подводный вулканизм Курильской островной дуги // Новейший и современный вулканизм на территории России (Отв. ред. Н.П. Лаверов) Москва: Наука, 2005. С. 233-335.
9. *Федорченко В.И., Абдурахманов А.И., Родионова Р.И.* Вулканизм Курильской островной дуги: геология и петрогенезис. // М.: Наука, 1989. 237 с.
10. *Bergal-Kuvikas O. V., Nakagawa M., Avdeiko G. P.* Origin of spatial compositional variations of volcanic rocks from Northern Kurile Islands: Geochemical studies of active volcanoes on Paramushir, Atlasova, Antsiferova islands and submarine volcanoes. IAVCEI. Kagoshima, Japan. July 2013. P. 106.

11. *Bergal-Kuvikas O. V.* Geochemical studies of volcanic rocks from the northern part of Kuril-Kamchatka arc: Tectonic and structural constraints on the origin and evolution of arc magma. Ph.D. thesis // Hokkaido University. 2015. P. 190.
12. *Bourova E., Yoshizawa K., Yomogina K.* Upper mantle structure of margin seas and subduction zones in Northeastern Eurasia from Rayleigh wave tomography // *Physics of the Earth and Planetary Interior*. 2010. 183. P. 20-32.
13. *Savchuk O.* Petrology and geochemistry of volcanic islands astride the Bussol Strait, Kurile Islands: investigation of the tectonic control on arc magmatism. Dissertation of Master Science // Hokkaido University. Japan. 2011. 87 p.
14. *Syracuse E.M. and Abers G.A.* Global compilation of variations in slab depth beneath arc volcanoes and implications // *Geochemistry Geophysics Geosystems*. 2006. 183. 7(5). P. 1-18.
15. *Syracuse E. M., van Keken P. E., Abers G. A.* The global range of subduction zone thermal models // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 2010. 183. 1. P. 73-90.
16. *Thorkelson D.J., Madsen J.K., Slaggett C.L.* Mantle flow through the Northern Cordilleran slab window revealed by volcanic geochemistry // *Geology*. 2011. 39 (3). P. 267-270.
17. *Zlobin T.K.* First results of the comparison of Catastrophic Simushir Earthquakes on November 15, 2006 (M=8.3) and January 13, 2007 (M=8,1), with the Deep Structure of the Earth's Crust in the Central Kuril Islands // *Doklady Earth Sciences*. 2008. Vol. 420. No. 4. P. 615-619.
18. [http://www.kscnet.ru/ivs/grant/grant\\_05/kurily/index.html](http://www.kscnet.ru/ivs/grant/grant_05/kurily/index.html)

## TECTONIC POSITION AND ASSOCIATED GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF QUATERNARY VOLCANIC ROCKS OF KURIL ISLAND ARC

***Bergal-Kuvikas O.V.***

*Institute of Volcanology and Seismology*

In order to study special variation of magma genesis in Kuril Island Arc numerical calculation of volume all Quaternary volcanoes were analyzed. Additionally, in order to detect specific features of magma origin the geochemical characteristics were observed along and across the arc. Comparing new receiving data and published results of geophysical study enable us to identify specific factors, which are control process of magma genesis in Kuril Island Arc.

*Key words: Kuril Island Arc, magmatism, subduction window*