

На правах рукописи



ЩЕРБАКОВ Юрий Дмитриевич

**ГЕОХИМИЯ И ПЕТРОЛОГИЯ ЩЕЛОЧНО-БАЗАЛЬТ-ТРАХИТ-
КОМЕНДИТОВОЙ СЕРИИ СРЕДИННОГО ХРЕБТА КАМЧАТКИ**

25.00.09 - геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Иркутск
2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель:

Перепелов Александр Борисович,
доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник
ИГХ СО РАН (г. Иркутск), заведующий лабораторией

Официальные оппоненты:

Киселев Александр Ильич,
доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник
ИЗК СО РАН (г. Иркутск), ведущий научный сотрудник

Мартынов Юрий Алексеевич,
доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник
ДВГИ ДВО РАН (г. Владивосток), заведующий лабораторией

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН (г.
Новосибирск)

Защита диссертации состоится 20 мая 2015 г. в 14-00 часов на заседании диссертационного совета Д003.059.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геохимии имени А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 664033, а/я 304, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1А.

Тел./факс: 8 (3952) 427050
e-mail: korol@igc.irk.ru
<http://www.igc.irk.ru>

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте (<http://www.igc.irk.ru>) Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан марта 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Г. Королева Королева Г.П.
кандидат геолого-минералогических наук

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Проблема происхождения щелочно-базальт-трахит-комендитовой серии пород (ЩБТК) широко освещается в научной литературе в связи с необходимостью установления источников умеренно-щелочного и щелочного магматизма в различных геодинамических обстановках, определения условий и направленности эволюции магм такого типа. Проявления щелочно-базальт-трахит-комендитового вулканизма характерны, главным образом, для внутриконтинентальных рифтовых зон [Scaillet, 2003; Ulusoy и др., 2012; White и др., 2012] и океанических островов [Carracedo, 1999; Cousens, 2003]. Значительно реже они наблюдаются на определенных этапах развития зон конвергенции литосферных плит – в развитых островодужных системах и на активных континентальных окраинах [Коваленко и др., 2010; Volynets, 1994]. Общие петролого-геохимические признаки участия в формировании магм ЩБТК серии активных окраин обогащенного мантийного вещества находятся в противоречии с представлениями о процессах надсубдукционного магмогенеза в зонах перехода «океан-континент». Следует предполагать, что проявления ЩБТК магм в зонах конвергенции литосферных плит должны быть связаны с особыми условиями магмообразования, отличными от условий как надсубдукционного, так и внутриплитного магмогенеза. Породы ЩБТК серий в таких обстановках должны обладать специфическими и индикаторными изотопно-геохимическими характеристиками, а их формирование в зонах перехода «океан-континент» отражает, вероятно, гетерогенный характер источников магматического вещества, природа которых в таких структурах может быть исследована с позиций современных представлений о процессах астеносферно-литосферного взаимодействия и мантийно-корового рециклинга.

Ярким примером развития ЩБТК магматизма в обстановках активных континентальных окраин является позднекайнозойский вулканический пояс Срединного хребта Камчатки [Патока, Успенский, 1977; Вольнец и др., 1984; Вольнец, 1993; Volynets, 1994; Колосков и др., 2012, 2013; Флеров и др., 2014]. Развитие ЩБТК магматизма в Срединном хребте ограничено структурами двух крупных вулканических центров, это вулканические центры Белоголовский и Большой-Кекунайский в тыловой пояса, которые являются в данной диссертационной работе **главными объектами исследований**.

Актуальность проведённого исследования состоит в предоставлении данных о времени развития и геологической позиции ЩБТК серии Камчатки по отношению к этапам развития надсубдукционного магматизма, в получении сведений о минералого-геохимических и изотопно-геохимических особенностях пород и в установлении источников, условий зарождения и процессов эволюции умеренно-щелочных магм в геодинамической обстановке активной континентальной окраины.

Основные задачи исследования заключались: 1) в установлении времени развития, геолого-структурной позиции ЩБТК вулканизма и пространственно-временных закономерностей проявлений умеренно-щелочных магм по отношению к вулканизму надсубдукционного геохимического типа в Срединном хребте Камчатки; 2) в проведении геохимической типизации пород ЩБТК серии с установлением закономерностей их вещественной эволюции и индикаторных редкоэлементных характеристик по отношению к вулканическим породам «островодужного» геохимического типа; 3) в определении условий происхождения и эволюции умеренно-щелочных магм с формированием дифференцированных серий, в том числе кислых агпатитовых расплавов; 4) в получении изотопно-геохимических данных об источниках магм ЩБТК серии Камчатки и доказательств их гетерогенной природы; и 5) в

разработке принципиальной геодинамической модели, определяющей роль процессов астеносферно-литосферного взаимодействия и мантийно-корового рециклинга в происхождении умеренно-щелочных магм в позднекайнозойской истории развития структуры Камчатки.

Фактический материал и методы исследования. В основу диссертационной работы положены геологические материалы, полученные автором лично при проведении научных экспедиционных исследований на территории Камчатки в составе отрядов ИГХ СО РАН, совместно с сотрудниками ИВиС ДВО РАН и геологического факультета МГУ в 2010-2014 годах, а также материалы предшествующих исследований. Изучено около 120 шлифов, определены составы минеральных парагенезисов в 12 образцах пород. Установлены $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ возраст 4-х и получены изотопные характеристики 15 образцов пород ЩБТК серии и вулканогенного фундамента изученных вулканических центров ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ и $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$). Установлены особенности распределения элементов платиновой группы (ЭПГ) для 13 проб. Методом LA-ICP-MS получены данные о распределении микроэлементов в породообразующих минералах вулканических пород ЩБТК серии Камчатки (8 образцов). Методами RFA, ICP-MS и MAES получены элементные составы большинства из использованных в работе 220 проб вулканических пород из коллекций автора и научного руководителя работы. Аналитические исследования проводились в лабораториях Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (г. Иркутск), в Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН (г. Новосибирск), в Геологическом институте СО РАН (г. Улан-Удэ) и в Байкальском аналитическом центре коллективного пользования ИНЦ СО РАН (г. Иркутск). Изотопное датирование пород и определение в них содержания ЭПГ проводилось в Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН (г. Новосибирск). Диссертационное исследование выполнялось согласно планам НИР ИГХ СО РАН и при проведении научных работ, поддержанных проектами Президиума СО РАН, грантами Президента РФ «Ведущие научные школы» НШ-6153.2012.5, НШ-5348.2014.5 и государственным контрактом Минобрнауки 16.515.12.5007. Данные были получены также при участии автора в выполнении исследований по ряду проектов РФФИ (11-05-01009-а, 14-05-00717-а, 13-0512026-офи_м).

Научная новизна исследования заключается в доказательстве позднеплиоцен-раннеплейстоценового возраста развития щелочно-базальт-трахит-комендитового вулканизма в вулканическом поясе Срединного хребта Камчатки; в определении ведущей роли процессов кристаллизационной дифференциации в формировании трахинадезит-трахит-комендитового ряда пород в составе ЩБТК серии; в первом обнаружении в К-Na трахитах Камчатки редкоземельных силикатов и установлении условий их кристаллизации; в установлении гетерогенного характера источников вещества в формировании умеренно-щелочных магм - деплетированной литосферной мантии «тихоокеанского» MORB типа и рециклированного вещества астеносферной мантии «индийского» MORB типа; в определении геодинамических условий формирования умеренно-щелочных магм в результате процессов астеносферно-литосферного взаимодействия в обстановке деструкции литосферных плит.

Практическая значимость исследования определяется возможностью использования полученных данных изотопного датирования пород ЩБТК серии с целью региональных корреляций магматического и геодинамического развития активной континентальной окраины Камчатки и использования этих данных при создании геологических карт нового поколения. Геохимические характеристики пород

ЩБТК серии могут учитываться при проведении металлогенического районирования территории. Разработанная модель формирования умеренно-щелочных магм в обстановке активной континентальной окраины может быть использована при палеогеодинамических реконструкциях.

Апробация результатов исследования. По теме диссертационной работы опубликовано 2 статьи в центральных российских журналах из списка ВАК - «Доклады Академии наук», «Вулканонология и сейсмология», а также 9 тезисов докладов в материалах российских конференций за период с 2010 по 2014 год.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и одного табличного приложения, общим объёмом 231 страница, включая 66 рисунков, 39 таблиц и список литературы из 145 наименований.

Благодарности. Автор выражает свою признательность сотрудникам научных и аналитических подразделений ИГХ СО РАН за помощь и поддержку в выполнении исследований. Проведение микрозондовых минералогических исследований было выполнено в сотрудничестве со специалистами ГИН СО РАН к.г.-м.н. Канакиным С.В и ИГМ СО РАН к.г.-м.н. Кармановым Н.С. Высококачественные аналитические данные получены благодаря высокому профессионализму химиков-аналитиков и специалистов Чувашовой Л.А., Коваль Л.П., Пахомовой Н.Н., к.х.н. Смирновой Е.В., Ложкина В.И., д.т.н. Васильевой И.Е., к.г.-м.н. Зарубиной О.В., к.ф.-м.н. Брянского Н.В., д.т.н. Финкельштейна А.Л., д.т.н. Шабановой Е.В. и Климовой А.К. Проведение экспедиционных работ и отбор коллекций материалов по объектам исследования были бы невозможны без помощи и участия Яковлева Д.М. (ИГХ СО РАН) и Пузанкова М.Ю. (ИВиС ДВО РАН). Автор выражает признательность докторам геол.-мин. наук Антипину В.С., Перетяжко И.С., Колоскову А.В., Горновой М.А., Медведеву А.Я., Иванову А.В., Плечову П.Ю., Макрыгиной В.А., Загорскому В.Е., Воронцову А.А., кандидатам геол.-мин. наук Флерову Г.Б., Дрилю С.С., Цыпуковой С.С., Палесскому С.В., Травину А.В., Чащину А.А., Щербакову В.Д., а также всем соавторам совместных научных статей и докладов по теме работы за научное сотрудничество и обсуждение материалов.

Автор благодарен академику РАН М.И. Кузьмину за поддержку и ценные рекомендации при проведении исследований.

В заключении, автор выражает свою признательность доктору геол.-мин. наук Перепелову А.Б., под научным руководством которого была выполнена данная диссертационная работа.

Защищаемые положения:

1. Умеренно-щелочной щелочно-базальт-трахит-комендитовый вулканизм проявлен в вулканическом поясе Срединного хребта Камчатки в позднеплиоцен-раннеплейстоценовое время после завершения в среднем плиоцене вулканизма надсубдукционного геохимического типа. Тектонический контроль проявлений умеренно-щелочных магм в структуре тыловой зоны вулканического пояса определяется развитием кулисообразных разломных зон и не имеет рифтогенной природы.

2. Вещественные признаки пород щелочно-базальт-трахит-комендитовой серии имеют гетерогенный характер и выражены в относительно высоких концентрациях в них высокозарядных и редкоземельных элементов (Ti, Ta, Nb, Zr, Hf, Th, U, P, REE), свойственных породам внутриплитных обстановок, а также в повышенных концентрациях литофильных элементов (K, Rb, Ba, Sr, Pb), характерных для надсубдукционных магм, и в специфически низких содержаниях элементов платиновой

группы (Pt, Pd), отражающих особые условия их формирования в обстановке конвергенции литосферных плит.

3. Происхождение трахитов, комендитовых трахитов и комендитов в составе умеренно-щелочной серии обусловлено процессами кристаллизационной дифференциации трахиандезитовых и затем трахитовых магм в малоглубинных магматических камерах с фракционированием главных порообразующих (Ol, Орх, Срх, Pl, Fsp, Kfs, Bt) и акцессорных минеральных фаз (Mgt, Ilm, Ap) и преобладающей ролью полевошпатового компонента. Трахибазальты не являются родоначальными для пород трахиандезит-трахит-комендитового ряда составов и не связаны с ними процессами дифференциации.

4. Источники умеренно-щелочных магм вулканического пояса Срединного хребта Камчатки имеют гетерогенное происхождение и отвечают составам деплетированной литосферной мантии «тихоокеанского» MORB типа и рециклированной литосферы с вещественными характеристиками близкими к MORB «индийского» типа. Образование умеренно-щелочных магм в обстановке активной континентальной окраины происходило в результате подъема обогащенного астеносферного вещества в область деплетированной литосферной мантии на этапе прекращения субдукции и в условиях деструкции океанической плиты.

В работе использован ряд сокращений методов аналитических исследований, наименований минералов, групп элементов и изотопных источников, главные из которых: LA-ICP-MS – лазерная абляция с индукционно связанной плазмой, Pl – плагиоклаз, Fsp – анортклаз, Kfs – K-Na полевой шпат, HFSE – высокозарядные элементы, LILE – крупноионные литофильные элементы, REE (PЗЭ) – редкоземельные элементы, LREE, HREE – лёгкие и тяжелые редкоземельные элементы, IAB – базальты островных дуг, MORB – базальты срединно-океанических хребтов, WPB – базальты внутриплитных обстановок, PREMA – преобладающая мантия, EM I – обогащённая мантия I-го типа, EM II – обогащённая мантия II-го типа, DM (D-DMM) – деплетированная мантия и деплетированная мантия MORB типа, ЭПГ – элементы платиновой группы.

Глава 1. Геологическое строение вулканического пояса Срединного хребта Камчатки, объекты и методы исследований

В главе даны сведения о геологическом строении Камчатки и истории ее геодинамического и магматического развития в кайнозое [Аккреционная тектоника..., 1993; Богданов, Хаин, 2000; Богданов, Чехович, 2004; Коваленко, 2010], а также данные о строении и этапах развития вулканического пояса Срединного хребта [Геодинамика, магматизм и металлогения..., 2006]. Приводятся материалы о геолого-структурной позиции, геологическому строению и истории изучения главных объектов исследования – вулканических центров Белоголовский и Большой-Кекукнайский, в строении которых обнаружены проявления умеренно-щелочных пород щелочно-базальт-трахит-комендитовой серии (ЩБТК) [Патока, Успенский, 1977; Волынец и др., 1981, 1983-1986, 1990; Volynets, 1994; Колосков и др., 2011, 2013] (рис. 1). В разделе «Методы исследований» приведены детальные характеристики применяемых RFA, ICP-MS, LA-ICP-MS, EDS методов аналитических исследований пород и микроанализа минералов.

Выполнена классификация составов пород исследованных вулканических центров [Петрографический кодекс..., 2009; Igneous rock..., 2002]. На основе оригинальных и литературных данных [Волынец, 1993; Колосков и др., 2011, 2013; Флеров и др., 2014] показано, что породы вулканогенного фундамента Белоголовского центра представлены базальтами, андезитами, дацитами и риолитами как умереннокалиевой, так и высококалиевой серий известково-щелочного ряда (рис. 2А). В то же время породы

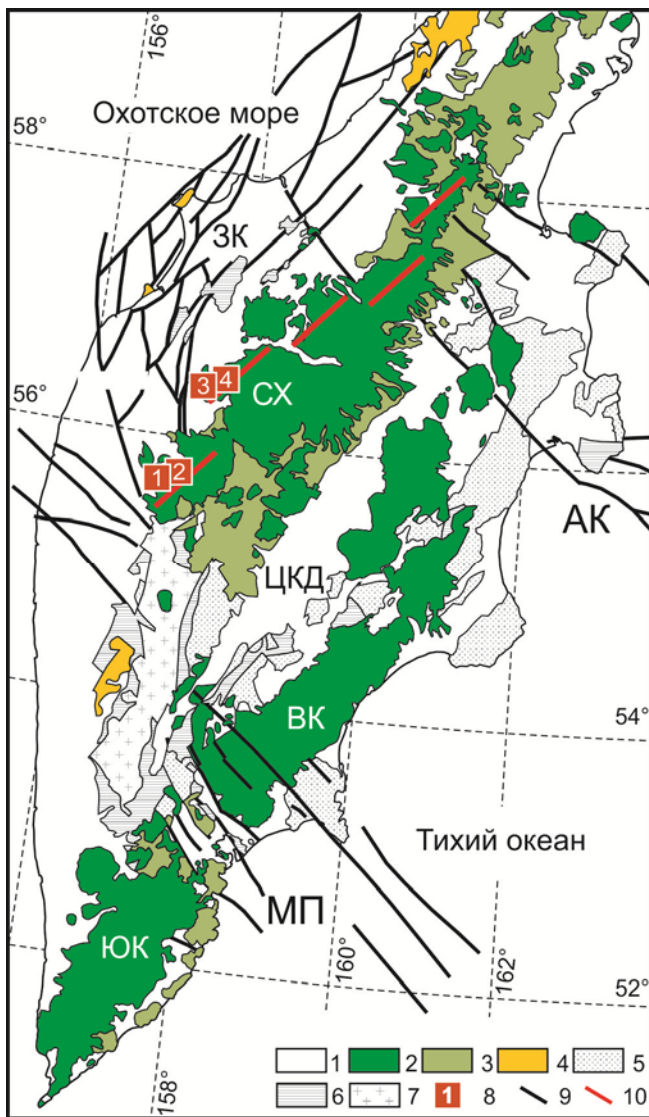


Рис. 1. Районы развития умеренно-щелочного ЩБТК вулканизма на схеме вулканических поясов Камчатки.

1 – вулканогенно-осадочные и терригенно-осадочные отложения; 2 – плиоцен-четвертичные вулканические пояса Южной Камчатки (ЮК), Восточной Камчатки (ВК) и Срединного хребта (СХ); 3 – миоценовые вулканогенные толщи; 4 – палеоценовый вулканический пояс Западной Камчатки (ЗК); 5 – палеогеновые вулканогенно-осадочные комплексы; 6 – позднемеловые вулканогенно-осадочные комплексы; 7 – палеозой-мезозойские гранитно-метаморфические комплексы; 8 – исследованные вулканические центры Срединного хребта Камчатки (1-2 – Белоголовский вулканический центр, 1 – вулкан Белоголовский, 2 – вулкан Носичан, 3-4 – вулканический центр Большой-Кекукнайский, 3 – вулкан Большой, 4 – вулкан Кекукнайский и ареальная зона Дола Геологов); 9 – разломные дислокации; 10 – разломные зоны с проявлениями умеренно-щелочных магм. Поперечные разломные структуры: МП – Малко-Петропавловская, АК – Алеутско-Камчатская.

фундамента вулканического центра Большой-Кекукнайский отвечают по составам базальтам, андезитам, дацитам и

риодацитам высококалиевой серии толеитового ряда (рис. 2Б).

Породы собственно К-На умеренно-щелочной серии исследованных вулканических центров классифицируются как трахибазальты, трахиандезибазальты, трахиандезиты, трахидациты, трахиты, комендитовые трахиты, трахириолиты и комендиты. Комендиты представлены умеренно-щелочными кислыми разностями пород с агпаитностью в интервале 0.94-1.04. При этом в строении центра Белоголовского трахиандезибазальты, трахидациты и комендитовые трахиты отмечены в единичных находках с образованием разрывов рядов составов пород серии в области трахиандезибазальтов (рис. 2А). Среди умеренно-щелочных пород центра Большой-Кекукнайский трахириолиты, комендиты и комендитовые трахиты не обнаружены (рис. 2Б). Породы более поздних вулканических построек в пределах территории Белоголовского центра и многочисленных шлаково-лавовых конусов зоны ареального вулканизма Дола Геологов на территории центра Большой-Кекукнайский представлены трахибазальтами, трахиандезибазальтами, андезибазальтами и андезитами умеренно-щелочной и нормально-щелочной серий с дискретным распределением групп составов по щелочности и кремнекислотности (рис. 2).

Тектонический контроль проявлений умеренно-щелочных магм в вулканическом поясе реконструируется по положению позднеплиоцен-раннеплейстоценовых и плейстоцен-голоценовых вулканических центров вблизи линейных разломных зон кулисообразного заложения. Такие зоны имеют косое несогласное заложение по

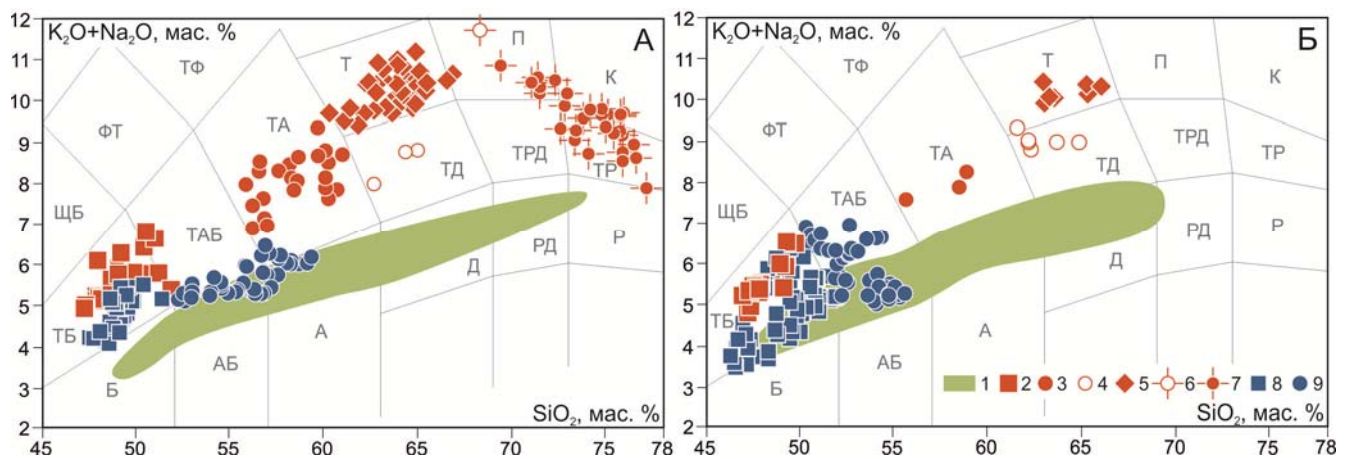


Рис. 2. Классификационные диаграммы (K_2O+Na_2O) - SiO_2 [Петрографический кодекс..., 2009] для пород вулканических центров Белоголовский и Большой-Кекукнайский.

1 – поле составов пород вулканогенного фундамента Белоголовского центра (А) и вулкана Кекукнайский (Б); 2-7 – точки составов пород умеренно-щелочной серии Белоголовского центра (А) и вулкана Большой (Б): 2 – трахибазальты, 3 – трахиандезиты, 4 – трахидациты, 5 – трахиты, 6 – комендитовый трахит, 7 – комендиты и трахириолиты; 8-9 – точки составов пород умеренно-щелочной и нормально-щелочной серий плейстоцен-голоценовых «рассошинского» вулканического комплекса района Белоголовского центра (А) и зоны ареального вулканизма Дола Геологов (Б): 8 - трахибазальты, 9 – трахиандезибазальты, андезибазальты, андезиты. Поля составов пород приводятся в соответствии с [Петрографический кодекс..., 2009].

отношению к простиранию надсубдукционного вулканического пояса (рис. 1). Морфологических и тектонических признаков рифтогенной природы структур, контролирующих проявления умеренно-щелочного вулканизма, не обнаружено.

Глава 2. Геолого-структурная позиция и геологическое строение вулканических центров Камчатки с проявлениями пород щелочно-базальт-трахит-комендитовой серии

В главе приводятся материалы по геологическому строению вулканических центров Белоголовский и Большой-Кекукнайский по [Колосков и др., 2011, 2013, Флеров и др., 2014] и собственным наблюдениям, а также литературные [Bindeman et al., 2010; Volynets et al., 2010] и оригинальные данные $^{40}Ar/^{39}Ar$ изотопного датирования слагающих их пород.

Показано, что вулканогенный фундамент Белоголовского вулканического центра, расположенного в составе Ичинской группы вулканов, представлен лаво-пирокластическими толщами, игнимбритами и экструзивными комплексами пород базальт-риолитового ряда составов, среди которых выделяются «кахтунский» и «крерукский» комплексы, отнесенные к наиболее раннему позднемiocен-среднеплиоценовому этапу магматического развития территории (~12-4 млн. лет), а также среднеплиоценовый эруптивно-дайкавый комплекс. Эти комплексы рассматриваются в работе на примере данных по эродированным толщам раннеплиоценового вулкана Носичан (~4.1 млн. лет) [Bindeman et al., 2010]. Фундамент центра Большой-Кекукнайский представлен среднеплиоценовыми лаво-пирокластическими толщами щитового вулкана Кекукнайский, для которого обычны площадные лавовые покровы базальтоидов (~3.2-3.0 млн. лет). В его структуре выделяется крупная кальдерная депрессия, имеющая, вероятно, вулкано-тектоническое происхождение, и комплекс внутрикальдерных экструзий высококальциевых андезитов и дацитов.

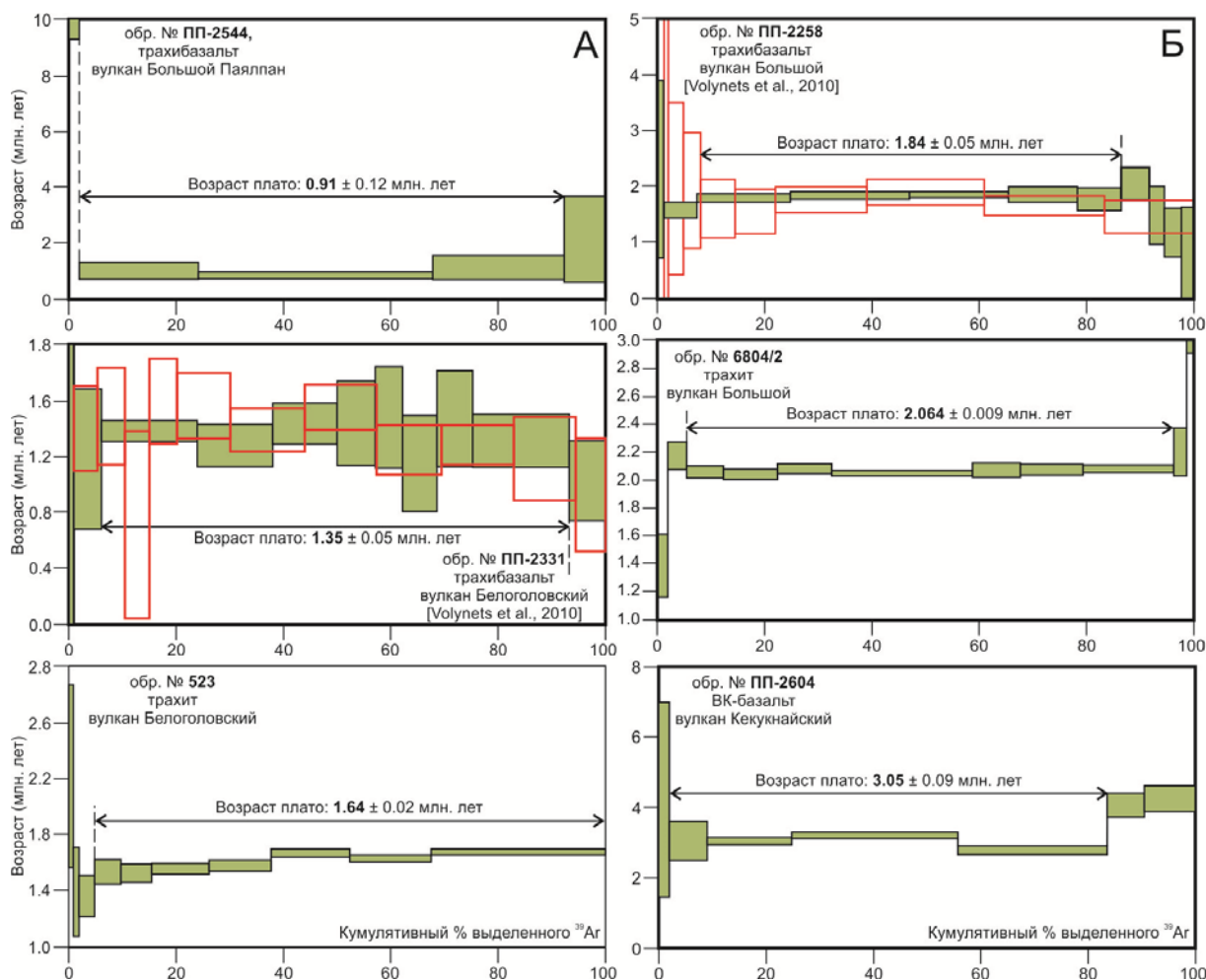


Рис. 3. Результаты $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирования пород вулканических центров Белоголовский (А) и Большой-Кекукнайский (Б) по новым данным и по [Volynets et al., 2010].

Данные по обр. № 523, 6804/2 из коллекции О.Н. Волынца.

С формирования нормально-щелочного андезитоидного эруптивно-дайкового комплекса в основании вулкана Белоголовский начинается следующий позднеплиоцен-раннеплейстоценовый этап развития одноименного центра (~3.0-1.3 млн. лет). На этом этапе, вулканогенные толщи которого отнесены к «белоголовскому» комплексу, проявляется умеренно-щелочной магматизм, представленный лавово-экструзивно-дайковыми комплексами существенно эродированного вулкана Белоголовский (~1.64 млн. лет) (рис. 3А). Трахиандезиты и трахиты этого вулканического сооружения образуют как мощные лавовые потоки, так и крупные экструзии и дайки, а комендиты, комендитовые трахиты и трахириолиты формируют небольшие субвулканические тела и дайки в завершение его развития. Трахибазальты в основании вулкана Белоголовский не обнаружены, и, возможно, имеют незначительное распространение. Вместе с тем исключительно мощные и протяженные лавовые покровы трахибазальтов образуются после завершения развития экструзивно-дайкового трахит-трахириолит-комендитового комплекса пород этого вулкана (~1.35 млн. лет) [Volynets et al., 2010] (рис. 3А). Начиная с раннего и до позднего плейстоцена, на территории Белоголовского центра формируются щитовые вулканы Большой Паялпан (~0.91 млн. лет), Алмазный, Тынуа, Малый Паялпан, Молодой Нюлканде и другие, с лавами, некками и дайками умеренно-щелочных базальтоидов и нормально-щелочных андезибазальтов и андезитов, которые отнесены к «*рассошинскому*» комплексу. Вулканическая активность в районе Белоголовского центра продолжается и по настоящее время в связи с активностью

одного из крупнейших в Срединном хребте и на Камчатке вулкана Ичинского [Певзнер, 2004, 2011].

После завершения формирования в среднем плиоцене вулкана Кекукнайский в развитии центра Большой-Кекукнайский отмечается перерыв в вулканической активности длительностью до 1 млн. лет [Перепелов, 2014]. Вулканическая деятельность возобновляется здесь в позднем плиоцене с формированием крупной щитовой постройки вулкана Большой и проявлением магм умеренно-щелочного типа. Наиболее ранние датированные $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ продукты вулканизма этого этапа представлены трахитами экструзии в юго-восточном секторе центра (~2.1 млн. лет) [Волынец, 1993; Volynets, 1994; Щербаков и др., 2014]. С этим этапом связано формирование дифференцированной трахиандезит-трахидацит-трахитовой ассоциации пород в строении мощной лавовой толщи и экструзивно-дайкового комплекса центральной части вулкана. Так же, как и для вулканического центра Белоголовский, протяженные лавовые покровы трахибазальтов щитовой постройки вулкана Большой образовались позднее, в раннем плейстоцене (~1.84 млн. лет) [Volynets et al., 2010]. После перерыва в вулканической активности на заключительном позднеплейстоцен-голоценовом этапе развития центра Большой-Кекукнайский формируется «наложенная» на эродированные щитовые постройки вулканов Большой и Кекукнайский зона ареального вулканизма Дола Геологов Позднеплейстоцен-голоценовый возраст отдельных шлаково-лавовых конусов этой зоны подтвержден радиоуглеродными датами. Кроме того, на северо-восточном фланге структуры вулкана Кекукнайский известно голоценовое проявление риолитов (маар Яма, ~ 7200 ^{14}C л.н.) [Певзнер, 2004, 2011; Pevzner, 2004].

Глава 3. Петрография и минералогия пород вулканических центров и их вулканогенного фундамента

В главе приводится минералого-петрографический анализ пород вулканогенного фундамента и умеренно-щелочных серий Белоголовского и Большой-Кекукнайского вулканических центров, данные о составах и эволюции минеральных парагенезисов, а также результаты LA-ICP-MS исследований редкоэлементного состава породообразующих минералов [Колосков и др., 2011, 2013; Флеров и др., 2014; Волынец, 1993; Щербаков и др., 2014].

Минеральные парагенезисы пород нормально-щелочных серий вулканогенного фундамента центров имеют сходные характеристики. Это Ol-Cpx-Orx-Pl парагенезис минералов-вкрапленников в базальтоидах, Cpx-Orx-Pl±Amph в андезитах и дацитах, с появлением в риолитах вкрапленников Bt. Среди микролитов во всех типах пород присутствуют Cpx, Orx, Pl, Mgt, Ilm и реже Fsp и Ap. Различия в составах минералов пород умереннокалиевой и высококалиевой серий состоят в увеличении щелочности полевых шпатов и в появлении Fsp среди микролитов.

В трахибазальтах умеренно-щелочных серий в сравнении с породами нормально-щелочного ряда вулканогенного фундамента вкрапленники Orx отсутствуют (Ol-Pl-Cpx-Mgt). Вместе с тем, в трахиандезитах (Ol-Orx-Cpx-Pl-Mgt-Amph-Bi) и трахитах (Ol-Cpx-Orx-Pl-Fsp-Kfs-Mgt-Amph-Bt) наблюдается развитие авгит-гиперстенового парагенезиса вкрапленников совместно с гидроксилсодержащими темноцветными минералами. Преимущественным распространением среди минералов-вкрапленников в трахитах и комендитовых трахитах (Cpx-Fsp-Kfs-Mgt-Amph-Bt) пользуются анортоклазы и K-Na полевые шпаты. По преобладанию среди вкрапленников Amph или Bt выделены соответствующие группы Amph- и Bt-трахитов, которые различаются своими

вещественными особенностями. Комендиты, в сравнении с другими типами пород серии, представлены редкопорфировыми и стекловатыми разностями с крайне незначительным развитием вкрапленников и микролитов Srx , Fsp , Kfs и Mgt . Во всех типах пород умеренно-щелочной серии развиты субфенокристаллы и микролиты Ar , Plm , а в трахитах и комендитах обнаружены также микролиты циркона, сфена и корунда [Волынец и др., 1990].

Повышенная К-На щелочность пород умеренно-щелочных серий отражается в присутствии щелочных алюмосиликатов (микролиты Ne) в трахибазальтах и щелочных темноцветных минералов в трахиандезитах, трахитах и комендитах. На уровне вкрапленников и микролитов в них отмечено развитие амфиболов Ca , $Ca-Na$ и Na типа (эденит, рихтерит, феррорихтерит, ферроекерманит, ребикит, арфведсонит), а среди пироксенов обнаружены эгирин-авгиты и редкие эгирины [Волынец, 1993].

Трахиты вулканического центра Большой-Кекукнайский имеют примечательные особенности минеральных парагенезисов. Им свойственно развитие на первом этапе кристаллизации Pl (An_{17-29}), биотита ($Mg_{\#66-70}$), салита и авгита (Wo_{42-48}). Далее происходит кристаллизация вкрапленников и субфенокристаллов Na -санидинов и анортоклазов ($Ab_{57-59}Or_{37-45}$), а также авгитов (Wo_{35-43}), $TiMgt$ (MgO 0.7-2.1 мас.%), Plm и Ar (F 2.5-2.9, Cl 0.42-1.33 мас.%). В завершение процесса кристаллизации в трахитах формируются микролиты авгита, ферроавгита ($Wo_{35-37}Fs_{34-42}$), ферропижонита ($Wo_{6-9}Fs_{44-60}$), рихтерита, анортоклаза (Or_{33-40}), Na -санидина (Or_{41-44}), циркона, циркелита (РЗЭ 11.2-11.8, ZrO_2 31.0-33.8, Nb_2O_5 8.4-10.8 мас.%), бадделеита, РЗЭ-содержащего фтор-апатита (РЗЭ 0.7-3.5, F 2.8-5.2 мас.%), $TiMgt$ и Nb -содержащего ильменита (Nb_2O_5 1.7-2.8 мас.%). В составе этого минерального парагенезиса в трахитах вулкана Большой впервые для активной континентальной окраины Камчатки обнаружены редкоземельные силикаты – чевкиниты [Щербаков и др., 2014]. Установлено, что чевкиниты формируются в условиях длительного процесса кристаллизации трахитового расплава в восстановительных условиях $\Delta \log_{10} fO_2$ от - 1.36 до -1,55 NNO, при относительно низких температурах (794-741 °С) (рис. 4) и умеренных концентрациях HF во флюиде 0.003-0.0029 моль/дм³ [Аксюк, 2002].

Методом LA-ICP-MS установлены особенности распределения редких элементов в главных породообразующих и акцессорных минералах для пород умеренно-щелочной серии (стандарт NIST 612, внутренний контроль по Si, Ti, P) (рис. 5). Показано, что анортоклазы и К-На полевые шпаты трахитов имеют высокие концентрации Ba, Sr и низкие содержания REE. Графики распределения REE для полевых шпатов демонстрируют высокую степень их фракционирования и отчетливый Eu максимум. Пироксены трахитов, напротив, заметно обогащены REE, а также Y и Sc. Наиболее высокими концентрациями REE, Y, Th и U обладают апатиты.

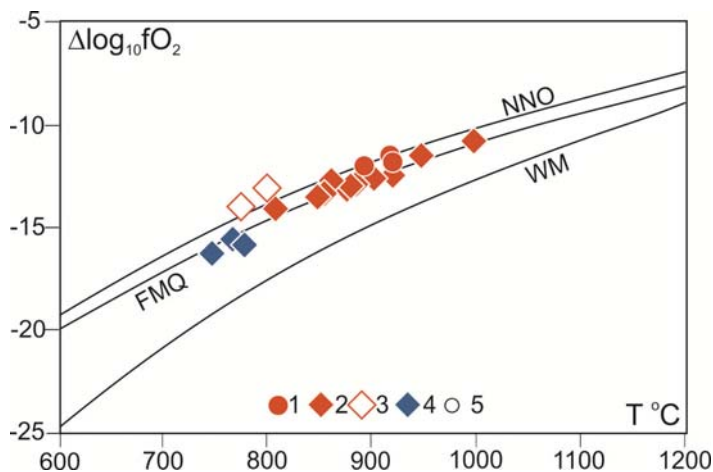


Рисунок 4. Условия кристаллизации трахиандезитов и трахитов по [Ghiorso, Evans, 2008].

1 – трахиандезиты, 2 – Amph-трахиты и 3 – Вт-трахиты вулканического центра Белоголовский, 4 - трахиты вулкана Большой.

Таблица 1. Коэффициенты распределения редких элементов «минерал/трахит» (LA-ICP-MS).

Мин.	Fsp	Cpx	Bt	Ilm	Ap
Rb	0.4	0.2	1.4	0.01	0.1
Sr	2.9	0.1	0.1	0.03	1.3
Y	0.1	3.4	0.2	1.3	27.6
Zr	0.2	0.4	0.1	0.9	0.1
Nb	0.2	0.1	1.5	18.7	0.01
Ba	2.1	0.03	4.0	0.03	0.04
La	0.2	0.9	0.4	1.4	42.8
Ce	0.2	1.4	0.4	1.8	56.6
Pr	0.1	1.8	0.3	2.3	48.9
Nd	0.1	2.5	0.3	2.1	48.1
Sm	0.1	3.8	0.3	2.5	49.5
Eu	1.4	1.9	0.4	1.0	42.4
Gd	0.2	4.3	0.3	2.6	49.8
Tb	0.1	4.7	0.3	2.0	46.3
Dy	0.1	5.0	0.2	1.9	40.3
Ho	0.1	4.4	0.2	1.5	34.3
Er	0.1	4.4	0.2	1.4	27.6
Tm	0.1	4.1	0.2	1.4	20.3
Yb	0.1	4.1	0.2	1.5	15.9
Lu	0.1	4.1	0.2	1.5	13.9
Hf	0.2	0.7	0.3	1.4	0.1
Ta	0.4	0.1	1.1	18.6	0.04
Pb	0.9	0.2	1.1	0.03	0.1
Th	0.2	0.1	0.1	0.2	2.3
U	0.4	0.4	0.2	0.2	2.1

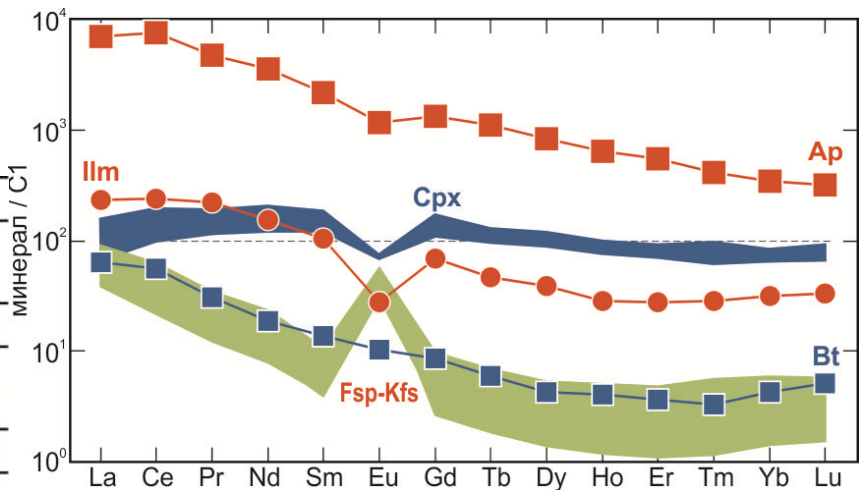


Рис. 5. Распределение РЗЭ в минералах трахитов вулканического центра Белоголовский (LA-ICP-MS).

Минералами-концентраторами Ва в трахитах, помимо полевых шпатов, являются биотиты. В слюдах из Bt-трахитов содержания Ва достигают значений в ~3300 ppm. Ильмениты пород умеренно-щелочной серии обогащены высокозарядными элементами (Nb, Zr, Hf) и в меньшей степени REE и Y. На основе полученных данных рассчитаны коэффициенты распределения редких элементов для минералов из трахитов (табл. 1), с использованием которых проведено микроэлементное моделирование процессов кристаллизационной дифференциации трахиандезитовых и трахитовых магм умеренно-щелочной серии.

Глава 4. Геохимия и вещественная эволюция пород вулканических центров Белоголовский и Большой-Кекукнайский

В главе рассмотрены особенности составов пород и вещественной эволюции умеренно-щелочных серий вулканических центров, а также серий нормальной щелочности вулканогенного фундамента и вулканических комплексов заключительных этапов развития исследованных структур.

Породы ранне-среднеплиоценового вулканогенного фундамента центров Белоголовский и Большой-Кекукнайский обладают всеми вещественными признаками их принадлежности к надсубдукционному или «островодужному» (IAB) геохимическому типу и различаются лишь вариациям содержаний ряда литофильных элементов. Для них характерны относительно повышенные концентрации CaO, низкие содержания TiO₂, P₂O₅ и обычная направленность изменения составов пород в эволюционном ряду от базальтов к риолитам со снижением TiO₂, FeO*, MgO, CaO, P₂O₅ и возрастанием концентраций Na₂O и K₂O. Индикаторные редкоэлементные отношения (Ba/Nb=68-184, Nb/Yb=0.8-4.6, La_N/Yb_N=3-7) и положение составов пород базальт-андезитового ряда на дискриминационных диаграммах также указывают на

принадлежность пород фундамента к надсубдукционному IAB типу (рис. 6, 7). На графиках распределения магматофильных элементов они характеризуются свойственными для надсубдукционных магм положительными аномалиями Ba, K, Pb и Sr, а также отчетливо пониженными концентрациями HFSE элементов (Ti, Ta, Nb и нередко Zr и Hf) (рис. 8). Высококалиевая серия фундамента вулканического центра Большой-Кекукнайский, представленная породами лавово-пирокластических толщ вулкана Кекукнайский, значительно обогащена многими LILE компонентами в сравнении с умеренно-калиевой серией фундамента Белоголовского центра (рис. 8А, Б).

Породы умеренно-щелочных ЩБТК серий вулканических центров, формирование которых происходит в позднеплиоцен-раннеплейстоценовое время, обладают вещественными чертами, сближающими их с составами магм внутриплитного геохимического типа (WPB), но отличающимися от последних рядом специфических признаков. Составы трахибазальтов и трахиандезитов ЩБТК серии ($Ba/Nb=14-45$, $Nb/Yb=6.8-14.1$) на дискриминационных диаграммах (рис. 6, 7), в сравнении с породами фундамента, тяготеют к полям пород WPB и E-MORB типа. Для них характерно значительное обогащение LILE и HFSE элементами вплоть до исчезновения аномалий по Ta, Nb, Zr и Hf на графиках нормированных концентраций, но сохранение слабо выраженных положительных аномалий для Pb и Sr (рис. 8). В эволюционном ряду пород умеренно-щелочной серии в трахиандезитах и трахитах продолжается возрастание концентраций Rb, Th, U, Zr, Hf, Nb и Ta на фоне снижения содержаний Sr, P и Ti. Составы выделенных среди трахитов их Amph- и Vt-содержащих типов различаются. Последние заметно обогащены Th и U, но обеднены Ba.

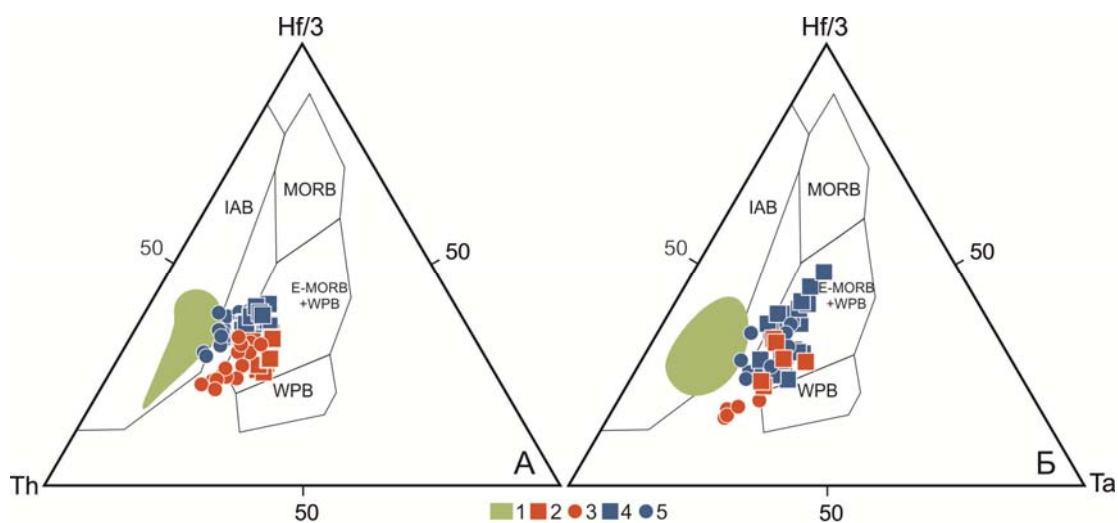


Рис. 6. Дискриминационная диаграмма Th-Ta-Hf/3 (ppm) по [Wood et al., 1979] для пород вулканических центров Белоголовский (А) и Большой-Кекукнайский (Б).

А. 1 – поле составов базальтов и андезитов ранне-среднеплиоценового вулканогенного фундамента, 2–3 – точки составов трахибазальтов (2), трахиандезитов и трахитов (3) умеренно-щелочной серии, 4-5 – точки составов трахибазальтов (4), трахиандезибазальтов и андезитов (5) раннеплейстоценового «рассошинского» комплекса и плейстоценовых щитовых вулканов.

Б. 1 – поле составов высококалиевых базальтов, андезибазальтов и андезитов среднеплиоценового щитового вулкана Кекукнайский, 2-3 – точки составов трахибазальтов (2), трахиандезитов и трахитов (3) умеренно-щелочной серии вулкана Большой, 4-5 – точки составов трахибазальтов (4) и трахиандезибазальтов (5) позднеплейстоцен-голоценовой зоны ареального вулканизма Дола Геологов. Поля составов базальтоидов: MORB, E-MORB – базальты срединно-океанических хребтов нормального и обогащенного типов, соответственно; WPB – базальты внутриплитных геодинамических обстановок, IAB – базальтов островодужного геохимического типа.

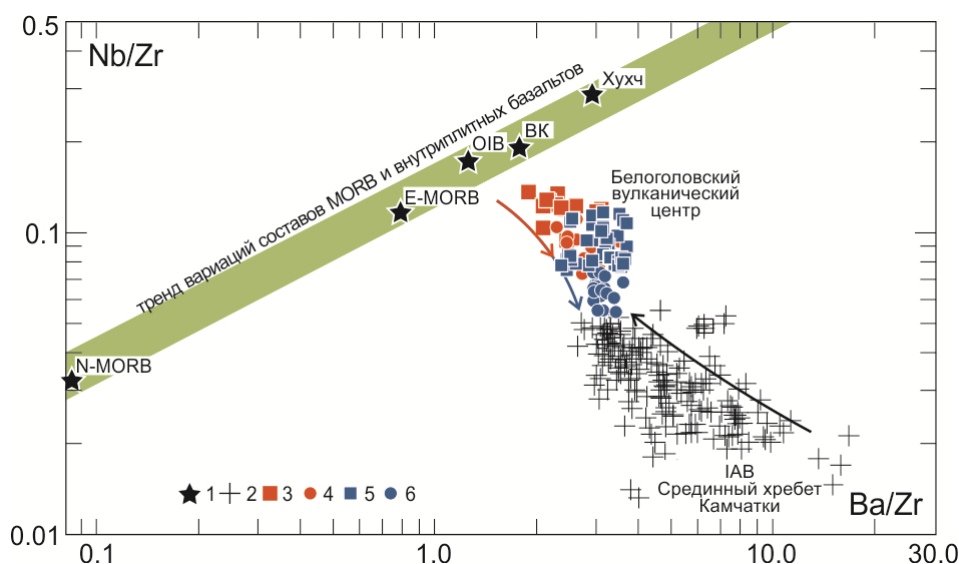


Рис. 7. Диаграмма Nb/Zr – Ba/Zr для пород вулканического центра Белооголовский и его вулканогенного фундамента.

1 – метки составов базальтов нормального (N-MORB) и обогащенного (E-MORB) типов Срединно-океанических хребтов и OIB – океанических островов по [Sun, McDonough, 1989]; BK – средний состав щелочных базальтов Восточной Камчатки [Волынец и др., 1990, 1995]; Хухч – средний состав базанитов горы Хухч (Западная Камчатка) [Перепелов, 2014]; 2 – составы базальтов и андезитов надсубдукционного геохимического типа вулканического пояса Срединного хребта Камчатки. А. 3-4 – составы пород умеренно-щелочной серии вулканического центра Белооголовский: трахибазальты (3) и трахиандезиты (4); 5-6 – составы пород раннеплейстоценового «рассошинского» вулканогенного комплекса и плейстоценовых щитовых вулканов: трахибазальты (5), трахиандезибазальты (6); Б. 3-4 – составы пород умеренно-щелочной серии вулкана Большой: трахибазальты (3) и трахиандезиты (4); 5-6 – составы пород ареальной зоны Дола Геологов: трахибазальты и базальты (5), трахиандезибазальты и андезибазальты (6).

Для комендитов умеренно-щелочной серии вулканического центра Белооголовский наблюдается их резкое обеднение Sr, P, Ba и Eu, а также значительное обогащение этих пород Th, U и HFSE относительно трахитов (рис. 8А).

Поведение LILE элементов в эволюционном ряду пород умеренно-щелочной серии отражает, в целом, направление процессов дифференциации умеренно-щелочных расплавов и смену типов минеральных парагенезисов с появлением минералов-концентраторов тех или иных элементов. Вместе с тем разрывы рядов составов пород серии на уровне петрогенных и редких элементов могут свидетельствовать о существовании нескольких исходных магм, в данном случае трахибазальтовых и трахиандезит-трахитовых.

Породы заключительных этапов развития исследованных структур, связанные с формированием в ранне-среднеплейстоценовое время «рассошинского» комплекса и группы щитовых вулканов в пределах Белооголовского центра, а также позднеплейстоцен-голоценовой зоны ареального вулканизма Дола Геологов, отличаются гетерогенностью вещественных характеристик. Для трахибазальтов и трахиандезибазальтов этих этапов сохраняются все установленные геохимические отличия от пород надсубдукционного типа (IAB), свойственные породам позднеплиоцен-раннеплейстоценовых умеренно-щелочных серий, но также устанавливается и относительное обогащение Ba, K, Pb и Sr, отличающее их составы от составов базальтоидов внутриплитных обстановок (OIB) (рис. 8).

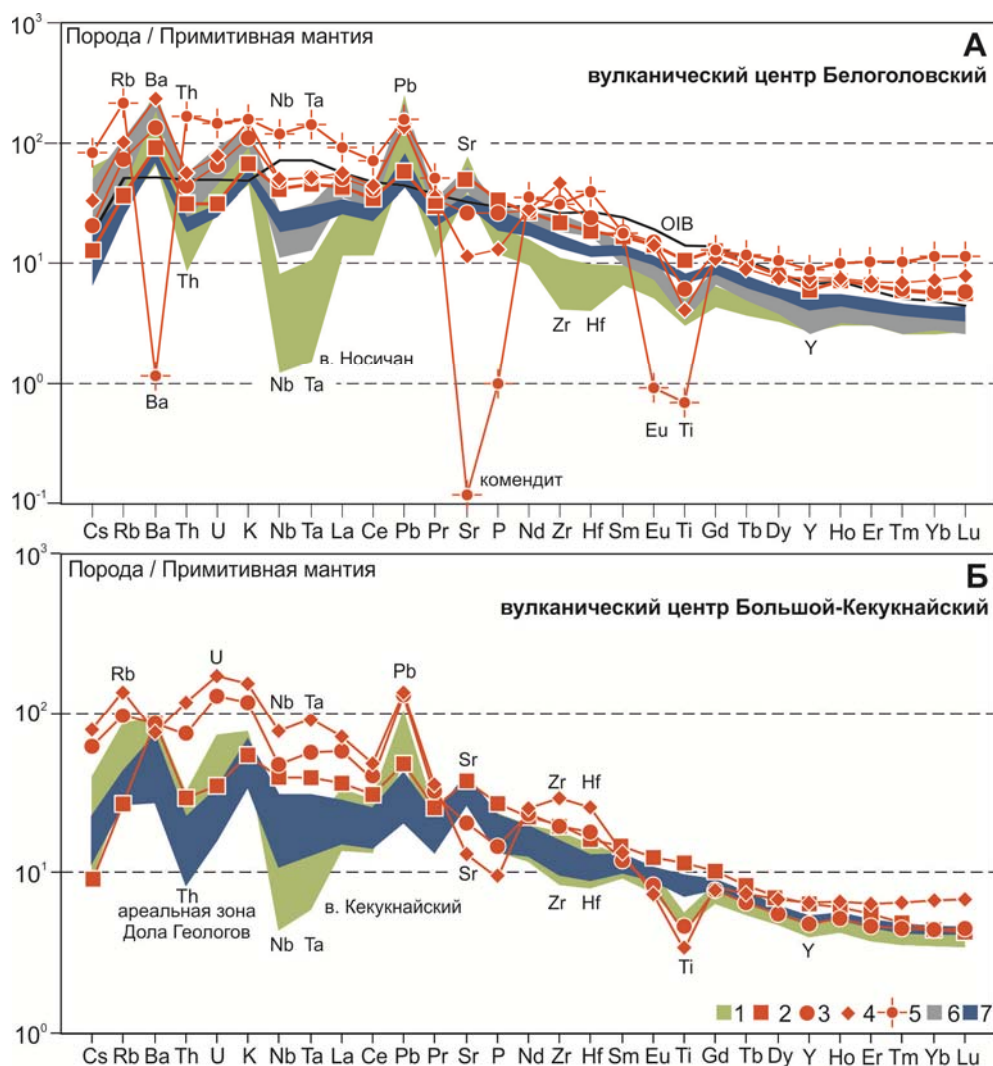


Рис. 8. Диаграмма распределения магматофильных элементов для пород вулканических центров Белоголовский (А) и Большой-Кекукнайский (Б).

Составы пород: 1 – базальты, андезибазальты и андезиты нормально-щелочных серий вулканогенного фундамента (А – вулкан Носичан, Б – вулкан Кекукнайский); 2-5 – породы позднеплиоцен-раннеплейстоценовых умеренно-щелочных серий (2 – трахибазальты, 3 – трахиандезиты, 4 – трахиты, 5 – комендиты); 6 – андезибазальты и андезиты раннеплейстоценового «рассошинского» комплекса Белоголовского центра (А), 7 – трахибазальты и трахиандезибазальты плейстоценовых щитовых вулканов Белоголовского центра (А) и зоны ареального вулканизма Дола Геологов (Б). Нормировано на примитивную мантию по [McDonough, Sun, 1995].

Андезибазальты и андезиты заключительных этапов также имеют более высокий уровень содержаний HFSE элементов в сравнении с серями нормальной щелочности IAB типа, но отличаются от пород умеренно-щелочной серии пониженными концентрациями как этих, так и LILE компонентов (рис. 6, 7, 8).

Анализ данных о распределении элементов платиновой группы (ЭПГ) в вулканических породах умеренно-щелочной серии Срединного хребта Камчатки дает основания для ряда выводов об источниках щелочно-базальтовых и кислых щелочных магм этой структуры. Трахибазальты и трахиты изученных вулканических центров обладают сходными характеристиками в распределении ЭПГ. Они выражаются в их относительном обеднении элементами платиновой (Pt, Pd) и в меньшей степени обеднении элементами иридиевой (Ir, Os) подгрупп, в сравнении с составами базальтов

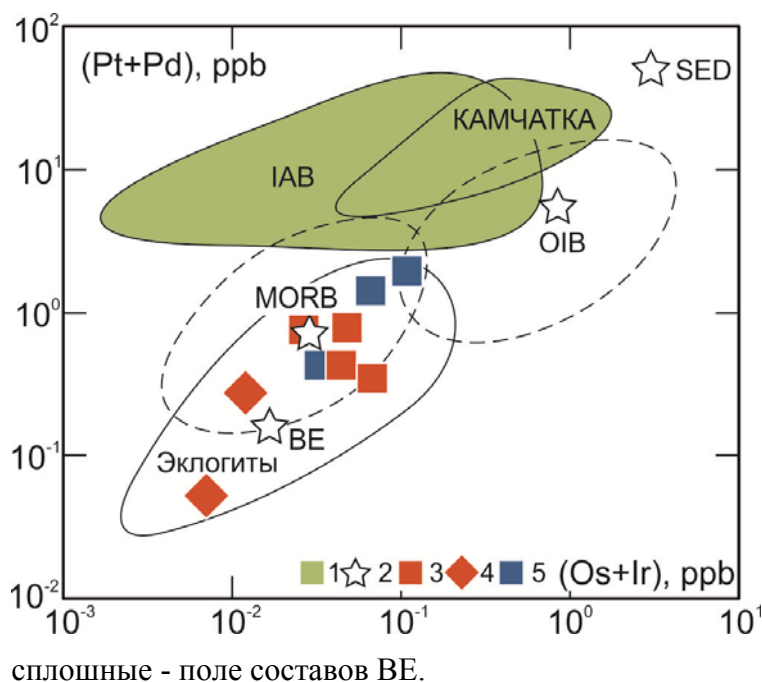


Рис. 9. Распределение Os, Ir, Pt и Pd в породах ЩБТК серии Срединного хребта Камчатки.

1 – IAB - поле составов базальтов островных дуг (IAB), «Камчатка» – поле составов пород IAB типа вулканических поясов Камчатки; 3 - средние составы MORB, OIB, SED (пелагические океанические осадки) и BE (базальтовые эклогиты); 3 – трахибазальты и 4 – трахиты вулканических центров, 5 – трахибазальты ареальной зоны Дола Геологов и щитовых вулканов Белоголовского центра. Пунктирные линии - поля составов MORB и OIB, сплошные - поле составов BE.

островодужного геохимического типа Камчатки и других островных дуг (рис. 9).

Еще более отчетливо они обеднены ЭПГ в сравнении с базальтоидами океанических островов, имеющих внутриплитную природу. С другой стороны, наблюдается близость концентраций ЭПГ в трахибазальтах Срединного хребта с полем составов базальтоидов MORB типа и их соответствие базальтовым эклогитам, которые являются продуктами высокобарических преобразований субдуцированной океанической коры. Таким образом, трахибазальтовые и трахитовые расплавы изученных вулканических центров несут признаки участия в их образовании деплетированного в отношении ЭПГ мантийного источника и не может быть сопоставлен с мантийным источником OIB типа или с источником Тихоокеанской астеносферной мантии. При этом еще более заметное обеднение ЭПГ трахитов в сравнении с трахибазальтами не может быть объяснено формированием исходных трахиандезит-трахитовых магм в условиях более низких степеней плавления эклогитизированного слэба или протеканием процессов дифференциации магм с участием самородных фаз и сульфидного компонента в виде включений во фракционирующих темноцветных минералах.

Глава 5. Условия образования умеренно-щелочных магм вулканических центров Белоголовский и Большой-Кекукнайский

В главе содержатся результаты моделирования процессов дифференциации трахибазальт-трахиандезит-трахитовых расплавов и оценка их роли в формировании пород ЩБТК серии Срединного хребта Камчатки, с использованием данных по изотопному составу пород приводятся сведения о вероятных источниках магм и их гетерогенной природе, а также предложена модель геодинамического развития Камчатки в плиоцен-четвертичное время и определена роль процессов астеносферно-литосферного взаимодействия в происхождении умеренно-щелочного вулканизма активной континентальной окраины.

Результаты микроэлементного моделирования процессов кристаллизационной дифференциации умеренно-щелочных расплавов с использованием полученных коэффициентов распределения «минерал/расплав» (табл. 1) приводят к следующим выводам. Трахибазальтовые магмы не связаны процессами дифференциации с

трахиандезитами и трахитами ЩБТК серии пород, что отмечалось и ранее [Волынец и др., 1990]. Начиная с трахиандезитов, составы пород серии образуют два эволюционных ряда в направлении Vt-трахитов и Amph-трахитов, которые имеют существенные различия, как в минеральных парагенезисах, так и по редкоэлементным характеристикам (рис. 10). При образовании из трахиандезитовых магм пород трахитового состава происходит фракционирование, главным образом, Ol+Pl и участием минералов Cpx+Mgt+Ilm+Ap парагенезиса. Затем, каждый из типов трахитовых расплавов формирует эволюционный ряд составов пород серии в изолированном друг от друга направлении. Фракционирование, главным образом Pl (Fsp) и Kfs и в меньшей степени Орх+Cpx+Mgt+Ilm+Ap из расплава Amph-трахита образует в остаточном расплаве комендитовый трахит. Удаление из расплава Vt-трахита Pl (Fsp), Kfs, Vt, Mgt, Ilm и в незначительных объемах Cpx+Орх+Ap формируют комендитовый остаточный расплав (рис. 10). Кристаллизация умеренно-щелочных магм в диапазоне составов трахибазальт-трахиандезит-трахит ЩБТК серии происходила в малоглубинных коровых камерах, при этом наиболее глубинные условия начала кристаллизации расплавов свойственны трахибазальтовым магмам, а малоглубинные характерны для трахиандезитов и трахитов.

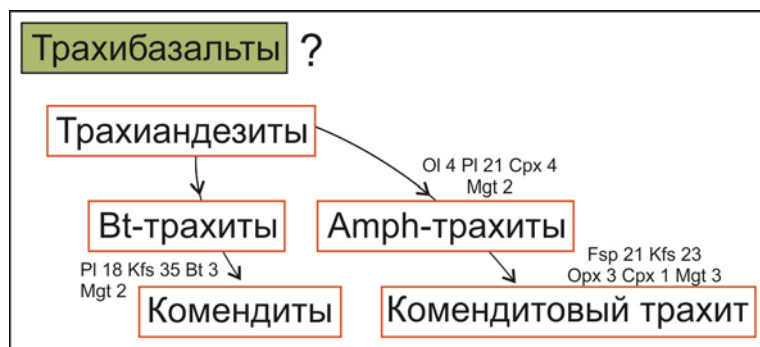


Рис. 10. Схема дифференциации умеренно-щелочных расплавов вулканического центра Белоголовский.

Расчеты дифференциации трахибазальтовых расплавов не дают удовлетворительного решения. Минералы указаны в об.%.

Из анализа изотопных данных следует ряд важных выводов о роли тех или иных источников вещества в формировании умеренно-щелочных магм ЩБТК серии Срединного хребта Камчатки. Следует отметить, что изотопные источники К-На умеренно-щелочных магм имеют признаки гетерогенности. С одной стороны это деплетированный мантийный источник, сходный по характеристикам с источником «командорского» MORB типа, а с другой – относительно обогащенный источник, имеющий характеристики близкие к «индийскому» MORB (рис. 11). Третьим вероятным источником вещества могла быть надсубдукционная мантия, метасоматизированная в процессе погружения океанической литосферы в зоне миоцен-плиоценовой субдукции относительно «древней» океанической плиты Кула или Изанаги.

Наиболее радиогенными изотопными составами пород по величинам $^{87}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ и $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ обладают обогащенные LILE и HFSE элементами и породы позднеплиоцен-раннеплейстоценовой ЩБТК серии Срединного хребта, в составе которой присутствуют трахибазальты, трахиандезиты, трахиты и комендиты. На следующем плейстоцен-голоценовом этапе в структурах Белоголовского и Большой-Кекукнайского центров проявляются трахибазальты и субщелочные базальты К-На типа, среди которых отмечены как обогащенные, так и умеренно-обогащенные LILE и HFSE породы, нередко обладающие геохимическими характеристиками переходными к IAB типу магм. Большинство базальтоидов этого этапа имеют отчетливо менее радиогенные изотопные составы и наиболее близки к источнику MORB типа (рис. 11).

В зависимости от вариаций условий формирования умеренно-щелочных магм, а именно степени плавления магмообразующего субстрата и роли различных источников

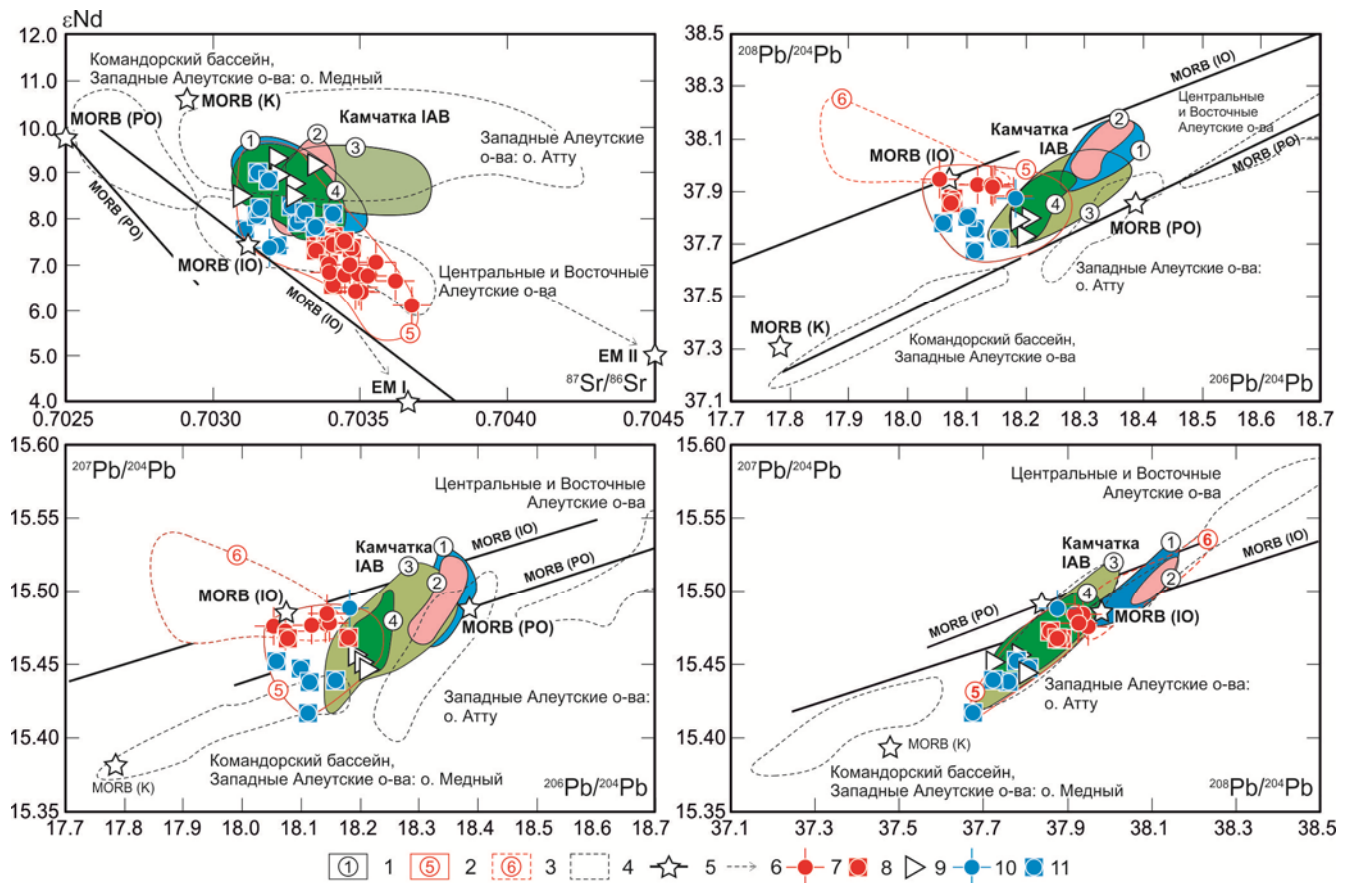


Рис. 11. Изотопные характеристики пород надсубдукционных вулканических поясов Камчатки и вулканических центров Белоголовский и Большой-Кекукнайский.

1 – поля изотопных характеристик базальтов и андезитов надсубдукционного геохимического типа вулканических поясов Камчатки (цифры в кружках составы пород вулканических поясов: 1 – Восточной Камчатки, 2 – Южной Камчатки, 3 – Центральной Камчатской депрессии, 4 – Срединного хребта); 2 – поле изотопных характеристик пород умеренно-щелочной серии и субщелочных К-На базальтоидов Срединного хребта Камчатки; 3 – поле составов субщелочных и щелочных К-На базальтоидов Восточной Камчатки; 4 – поля составов базальтов и андезитов Командорского бассейна и Западных Алеутских островов, Западных Алеутских островов (о. Атту), Центральных и Восточных Алеутских островов, п – количество проб; 5 – тренды эволюции и средние значения изотопных характеристик для MORB-(IO) и Тихого океанов MORB, MORB(K) – базальтов Командорского бассейна, EM I и EM II - обогащенной и мантии; 6 – направления к меткам изотопных резервуаров; 7-8 – точки составов пород умеренно-щелочных серий вулканического центра Белоголовский (7 – позднеплиоцен-раннеплейстоценовой дифференцированной серии центра и 8 – ранне-среднеплейстоценовых щитовых вулканов); 9-11 – точки составов пород вулканического центра Большой-Кекукнайский (9 – высококальциевой нормально-щелочной серии вулкана Кекукнайский, 10 – умеренно-щелочной серии вулкана Большой, 11 – зоны ареального вулканизма Дола Геологов). Использованы опубликованные данные и данные автора.

вещества в их образовании, происходит последовательное изменение химизма и изотопных составов продуцируемых ими вулканических пород. Следует предполагать, что роль обогащенного изотопного источника типа «индийского» MORB была максимальной при образовании исходных магм ЩБТК серии, тогда как при формировании пород более позднего этапа более значительную роль приобретает деплетированный источник, сходный с «командорским» MORB. Это может быть объяснено в рамках геодинамической модели развития структуры Камчатки в позднее-

миоцен-плейстоценовое время, представленной ниже.

Природа деплетированного источника умеренно-щелочных магм Срединного хребта в позднеплиоцен-раннеплейстоценовое время выглядит вполне однозначной. Эти источником должно было быть вещество деплетированной океанической литосферы MORB типа, близкой по составу к MORB Тихого океана. Согласно геодинамическим построениям для северо-западного сегмента Тихого океана таким источником должна была быть деплетированная литосфера субдуцируемой в миоцен-плиоценовое время под структуру активной окраины Камчатки океанической литосферной плиты Изагаги и, возможно, фрагмента плиты Кула. Природа обогащенного источника для магм ЩБТК серии Срединного хребта может быть объяснена с позиций рециклинга древнего литосферного вещества океанической, но возможно и нижнекоровой природы, с формированием диапира (плюма) в астеносферной мантии под Западным сегментом структуры Камчатки. Основанием для такого вывода служат, в частности, изотопные особенности умеренно-щелочных пород исследованных вулканических центров (трахибазальты, трахиандезибазальты, трахиты и комендиты). Сближение их изотопных характеристик $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ и $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ с полем изотопных составов Индийского MORB может говорить о близкой природе их источников вещества. Участие источника типа «индийского» MORB для тыловой зоны Курильской островной дуги было показано в работе [Мартынов и др., 2012]. В данном исследовании установлено, что обогащенный мантийный источник, роль которого зафиксировано в образовании умеренно-щелочных магм Срединного хребта, обладает относительно низкими величинами $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ отношений в сравнении с IAB Камчатки и повышенными значениями $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ и $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ изотопных отношений в прямой зависимости от степени обогащения пород LILE и HFSE компонентами. При этом роль источника вещества типа EMI или OIB в формировании умеренно-щелочных магм тылового вулканического пояса Срединного хребта, в отличие от предложенных ранее моделей [Churikova et al., 2001; Volynets et al., 2010], не может быть применена к исследуемым комплексам пород.

Разработана геодинамическая модель образования умеренно-щелочных магм в тыловой зоне вулканического пояса Срединного хребта Камчатки в условиях реализации процессов астеносферно-литосферного взаимодействия и участия в магмообразовании гетерогенных источников вещества (рис. 12). Достижение условий астеносферно-литосферного взаимодействия, которое обусловило участие в магмообразовании гетерогенных по составам источников вещества и формирование умеренно-щелочных магм Срединного хребта, может быть объяснено в рамках нескольких гипотез. Первая из них предполагает, что в результате прекращения субдукции становится возможным подъем астеносферного материала в область надсубдукционного мантийного клина вдоль границы палеослаба в результате затухания процессов сжатия. Другая гипотеза основана на предположении об образовании в структуре субдуцированной океанической плиты под Срединным хребтом зоны деструкции или разрыва (slab-window) и поступление в эту зону деструкции вещества астеносферного диапира. Наконец третья связана с возможностью поступления рециклированного вещества в виде астеносферного плюма в область между внешней деструктивной границей палеослаба и современной субдуцируемой океанической литосферной плитой. Принимая во внимание отчетливый структурно-тектонический контроль районов проявления умеренно-щелочных магм в тыловой зоне вулканического пояса Срединного хребта в северо-восточном направлении по его простирацию, представляется, что такой контроль был определен формированием области деструкции палеослаба – «slab-window»), то есть в рамках второй из представленных гипотез.

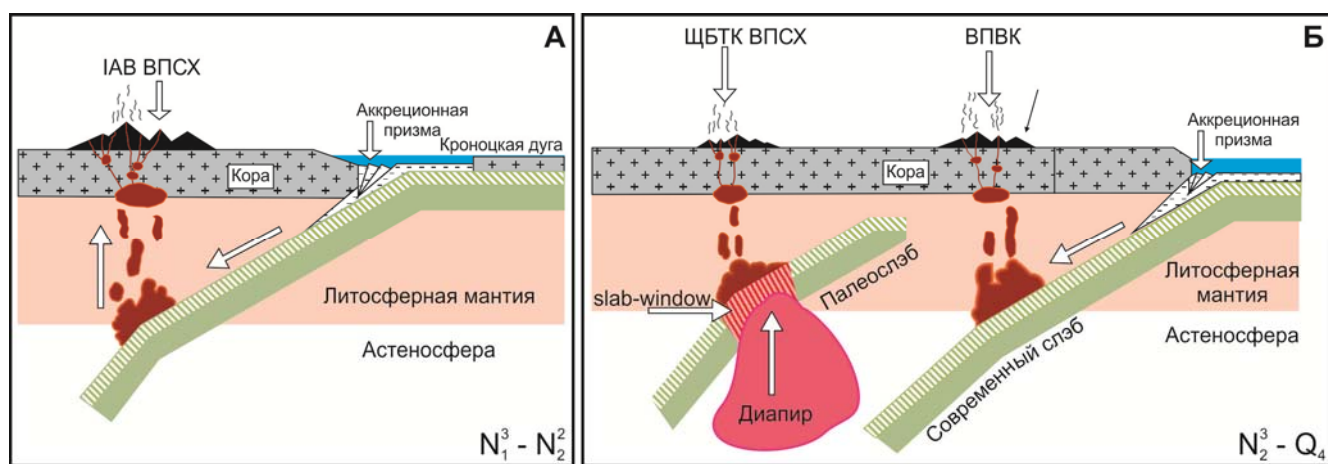


Рис. 12. Схема геодинамического развития Камчатки в позднемиоцен-среднеплиоценовое время и условия формирования умеренно-щелочных магм в вулканическом поясе Срединного хребта.

IAB и ЩБТК ВПСХ – районы развития надсубдукционного (IAB) и щелочно-базальт-трахит-комендитового вулканизма (ЩБТК) в вулканическом поясе Срединного хребта (ВПСХ). ВПВК – вулканический пояс Восточной Камчатки.

Заключение. В результате проведенных геохронологических, петролого-геохимических и изотопно-геохимических исследований вулканических центров Белоголовский и Большой-Кекукнайский вулканического пояса Срединного хребта Камчатки установлено, что формирование вулканогенных толщ в структурах исследованных центров проходило на протяжении трех главных этапов. На ранне-среднеплиоценовом этапе был сформирован вулканогенный фундамент, представленный породами нормально-щелочной серии «островодужного» (IAB) геохимического типа. После перерыва в вулканической деятельности в позднеплиоцен-раннеплейстоценовое время в строении вулканических центров проявились магмы умеренно-щелочного типа с формированием дифференцированных трахиандезит-трахит-комендитовых и трахиандезит-трахитовых рядов составов пород в составе щелочно-базальт-трахит-комендитовой серии. При этом установлено, что трахибазальты имеют самостоятельное значение и не связаны в рядах дифференциации с кислыми и средними умеренно-щелочными породами серии. На заключительных этапах вулканической деятельности в плейстоцен-голоценовое время в пределах изученных центров проявляются магмы, как умеренно-щелочного базальтоидного, так и андезитоидного нормально-щелочного типа, имеющие гетерогенные вещественные характеристики.

Полученные данные о составе минеральных парагенезисов пород умеренно-щелочной серии, а также данные о редкоземельном составе породообразующих и аксессуарных минералов (LA-ICP-MS) позволили предложить модель кристаллизационной дифференциации умеренно-щелочных магм. Установлены прямые генетические связи между трахиандезитами, трахитами, комендитовыми трахитами и комендитами и определена ведущая роль в процессах дифференциации средних и кислых по составу магм полевошпатового компонента. Впервые для активной континентальной окраины Камчатки в трахитах вулкана Большой обнаружены минеральные парагенезисы с участием редкоземельных силикатов (чевкинит).

Установлено, что в породах IAB типа, предвещающих по времени проявления умеренно-щелочных магм, и в вулканических породах завершающих развитие изученных центров, возрастают концентрации HFSE компонентов, что указывает на относительно постепенное изменение роли надсубдукционных источников магм и

источников, ответственных за формирование умеренно-щелочных магм, в истории эволюции вулканических структур. Особенности распределения элементов платиновой группы (Os, Ir, Pt, Pd), содержания которых в породах умеренно-щелочной серии примечательно низкие в отличие от относительно обогащенных ими надсубдукционных магм показывают, что в формировании исходных расплавов для пород ЩБТК серии должно было принимать участие обедненное этими компонентами высокобарически преобразованное литосферное вещество. Наблюдаемые изотопные особенности пород ЩБТК серии, а именно низкие величины отношений $^{144}\text{Nd}/^{143}\text{Nd}$ и $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, и, напротив, высокие значения $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ удовлетворяют модели участия в магмообразовании гетерогенных источников – вещества деплетированной мантии MORB «тихоокеанского» типа и обогащенного вещества близкого к изотопным характеристикам MORB «индийского» типа. Последний источник идентифицирован в работе как рециклированное вещество древней литосферы, поднимающееся в область деструкции палеослаба и взаимодействующее с литосферной мантией «тихоокеанского типа».

Дальнейшие исследования умеренно-щелочного вулканизма геодинамической обстановки активной континентальной окраины Камчатки должны быть связаны с вовлечением в изучение других стабильных и радиогенных изотопных систем, получением более широкого спектра данных по редкоэлементному составу минералов. Важным представляется усиление исследований распределения в породах ЭПГ и детализация сведений о минеральном и вещественном составе позднеплейстоцен-голоценовых проявлений магм такого типа. Последнее связано с гетерогенностью их составов и возможно ключевой позицией в решении вопросов о роли надсубдукционных и внутриплитных источников магм в развитии необычного для таких геодинамических обстановок вулканизма K-Na умеренно-щелочного типа.

Список публикаций по теме диссертации

Статьи:

1. Щербаков Ю.Д., Перепелов А.Б., Карманов Н.С., Пузанков М.Ю., Цыпукова С.С. Первые данные о редкоземельных силикатах в вулканических породах Камчатки. // Доклады Академии наук. 2014. Т. 459. № 5. С. 618-623.

2. Флеров Г.Б., Перепелов А.Б., Пузанков М.Ю., Колосков А.В., Философова Т.М., Щербаков Ю.Д. Пространственно-временные соотношения вулканических ассоциаций разной щелочности Белоголовского массива (Срединный хребет Камчатки). Часть 1. Геология, минералогия и петрология вулканических пород. // Вулканология и сейсмология. 2014. № 3. С. 3-23.

Тезисы докладов:

1. Цыпукова С.С., Перепелов А.Б., Щербаков Ю.Д. Гавайиты океанических островов, активных континентальных окраин и внутриконтинентальных рифтовых зон (Гавайи, Камчатка, Северная Монголия) // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту). Материалы научного совещания по Программе фундаментальных исследований ОНЗ РАН, ИЗК СО РАН. Иркутск. 2010. Вып. 8. Т. 2. С. 148-151.

2. Перепелов А.Б., Чащин А.А., Павлова Л.А., Цыпукова С.С., Демонтерова Е.И., Плечов П.Ю., Щербаков В.Д., Ильина Н.Н., Щербаков Ю.Д. Адакитовый, Mg# андезитовый и NEB магматизм деструктивных границ литосферных плит (Центральная Камчатская депрессия) // Материалы Всероссийского совещания (с участием

иностранных ученых), посвященное 95-летию со дня рождения академика Л.В. Таусона «Проблемы современной геохимии». 22-26 октября 2012 г. Иркутск. Т.2. С.154-156.

3. Щербаков Ю.Д., Карманов Н.С., Перепелов А.Б. Геохимия, минералогия и первые данные по редкоземельным силикатам щелочных трахитов Срединного хребта Камчатки // Материалы Всероссийского совещания (с участием иностранных ученых), посвященное 95-летию со дня рождения академика Л.В. Таусона «Проблемы современной геохимии». 22-26 октября 2012 г. Иркутск. Т.2. С. 194-196.

4. Щербаков Ю.Д., Перепелов А.Б., Карманов Н.С. Геохимия и особенности процессов кристаллизации щелочных трахитов вулкана Большой (Срединный хребет Камчатки) // Материалы конференции «Геонауки-60. Актуальные проблемы геологии, планетологии и геоэкологии». 21-22 мая 2012 г. Иркутск С. 164-170.

5. Щербаков Ю.Д., Перепелов А.Б., Карманов Н.С. Геохимия и минералогия позднекайнозойских трахитов Камчатки // Современные проблемы геологии, геохимии и экологии Дальнего Востока России. Материалы конференции. 27 августа – 5 сентября 2012 г. Владивосток С. 136-138.

6. Перепелов А.Б., Пузанков М.Ю., Чашин А.А., Иванов А.В., Палесский С.В., Щербаков Ю.Д. Базальтоидный вулканизм НЕВ типа в островодужной системе Камчатки: происхождение и палеогеодинамические следствия // Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции «Геодинамика и минерагения Северо-Восточной Азии». Улан-Удэ. 2013. С. 282-285.

7. Щербаков Ю.Д., Попов В.К., Перепелов А.Б. Условия кристаллизации и редкоземельные минералы трахитов окраинно-континентальных геодинамических обстановок (вулканы Большой и Пектусан) // Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции «Геодинамика и минерагения Северо-Восточной Азии». Улан-Удэ. 2013. С. 423-426.

8. Перепелов А.Б., Пузанков М.Ю., Иванов А.В., Чашин А.А., Флеров Г.Б., Травин А.В., Цыпукова С.С., Щербаков Ю.Д. Кайнозойский магматизм Камчатки на этапах смены геодинамических обстановок // Материалы Второй Всероссийской конференции с международным участием «Геологические процессы в обстановках субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит». Владивосток. 17-20 сентября 2014. С. 224-227.

9. Щербаков Ю.Д., Перепелов А.Б., Карманов Н.С., Брянский Н.В. Процессы кристаллизационной дифференциации в происхождении трахиандезит-трахит-комендитовой ассоциации пород вулкана Белоголовский (Камчатка) по данным EDS и LA-ICP-MS исследований // Материалы Второй Всероссийской конференции с международным участием «Геологические процессы в обстановках субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит». Владивосток. 17-20 сентября 2014. С. 224-227.

Подписано к печати 2015 г.
Формат 60*84/16. Объем 1,4 п.л. Тираж 130 экз. Заказ № .
Издательство Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН.
664033 г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1.