

На правах рукописи



ЦЫПУКОВА Светлана Семеновна

**ГЕОХИМИЯ И ПЕТРОЛОГИЯ НЕОГЕНОВОГО ЩЕЛОЧНО-
БАЗАЛЬТОВОГО ВУЛКАНИЗМА ПЛАТО ХЭВЭН
(СЕВЕРНАЯ МОНГОЛИЯ)**

25.00.09 - геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Иркутск
2014

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

Научный руководитель:

кандидат геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник
Перепелов Александр Борисович

Официальные оппоненты:

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

кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник
Орсоев Дмитрий Анатольевич,
ГИН СО РАН (г. Улан-Удэ), заведующий лабораторией

Ведущая организация:


Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Дальневосточный геологический институт Дальневосточного отделения
Российской академии наук (г. Владивосток)

Защита диссертации состоится «16 апреля» 2014 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 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан «__6__» марта 2014 г.

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

Актуальность работы. Петролого-геохимические исследования щелочно-базальтового вулканизма внутриконтинентальных рифтовых областей ставят своей целью определение источников магматических расплавов, условий образования и эволюции магм, а также дают необходимые сведения для разработки моделей состояния и взаимодействия литосферной и подлитосферной мантии на различных этапах их геологической эволюции. В Центральной Азии рифтогенные процессы и связанный с ними вулканизм широко проявлены в фанерозойской истории развития складчатого обрамления Сибирского кратона [Воронцов, Ярмолюк, 2004; Коваленко и др., 2009]. Крупнейшей рифтогенной структурой в Центральной Азии является Байкальская рифтовая зона (БРЗ) [Киселев и др., 1979; Рассказов, 1993; Логачёв, 2003; Буслов, 2012]. Вблизи юго-западного фланга БРЗ выделяется Южно-Байкальская вулканическая область (ЮБВО) с масштабными проявлениями позднекайнозойских вулканических процессов [Ярмолюк и др. 2003]. Одним из наиболее крупных вулканических ареалов ЮБВО является Прихубсугульский, который представляет значительный интерес в изучении раннего неогенового этапа тектоно-магматического развития этой области [Рассказов, 1993; Ярмолюк и др., 2003; Демонтерова и др., 2007]. Решение ряда актуальных петрологических вопросов эволюции неогенового вулканизма ЮБВО, а именно: установление источников базальтоидных магм, условий их формирования и кристаллизации, а также направленности эволюции вулканических процессов во времени, - требует проведения детальных исследований крупных вулканических структур с продолжительной историей магматического развития. В восточном секторе Прихубсугульского ареала такой структурой, в связи со значительным объемом продуктов вулканических извержений и длительностью формирования, является лавовое плато Хэвэн Залу Урийн Сарьдаг (плато Хэвэн).

Целью работы является создание модели происхождения и эволюции неогенового щелочно-базальтового вулканизма плато Хэвэн, установление его петротипических особенностей и позиции в истории магматического развития Южно-Байкальской вулканической области.

Основные задачи исследования:

1. Изучение строения вулканического плато Хэвэн и выделение этапов его развития на основе геологических данных и результатов изотопного датирования пород.
2. Проведение геохимической типизации вулканических пород плато Хэвэн и установление вещественной эволюции вулканизма во времени.
3. Исследование составов минеральных парагенезисов пород и определение условий и направленности процессов кристаллизации щелочно-базальтовых магм.
4. Установление условий формирования магматических расплавов плато Хэвэн с использованием геотермобарометров, микроэлементного моделирования и данных о состоянии и составе литосферной и подлитосферной мантии южного фланга ЮБВО.
5. Определение источников магматических расплавов плато Хэвэн на основе изотопных характеристик Sr, Nd и Pb и создание модели происхождения и эволюции неогенового вулканизма плато Хэвэн на основе представлений о

процессах плюм-литосферного взаимодействия.

Фактический материал и методы исследования. В основу диссертации положены материалы, полученные автором лично за период 2008 - 2013 гг. в ходе проведения научно-исследовательских работ по интеграционным проектам СО РАН, проектам Программ Президиума РАН и проектам РФФИ № 11-05-00425, 13-05-12026_офи-м. Геологические материалы по неогеновому вулканизму Южно-Байкальской вулканической области получены автором во время проведения экспедиционных исследований в составе отрядов ИГХ СО РАН в Северной Монголии (2008, 2009, 2011, 2012 гг.) и в хребте Хамар-Дабан (2010 г.). Фактический материал представлен коллекциями из 148 образцов вулканических пород для плато Хэвэн и 206 образцов по другим вулканическим ареалам ЮБВО (плато Тумусун, плато Агуйтын-нуруу, Дархатской котловине). Установлены составы 122 проб вулканических пород плато Хэвэн (RFA), из них для 57 проб определены микроэлементные характеристики (ICP-MS). Изучено более 120 шлифов, для 7 образцов базальтоидов установлены составы минеральных парагенезисов (WDS, EDS). Выполнено более 1200 анализов вкрапленников, субфенокристаллов и микролитов минералов, а также интерстиционных выделений и участков основной массы пород. Для 7 проб базальтоидов получены изотопные характеристики - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $^{144}\text{Nd}/^{143}\text{Nd}$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$. Три образца базальтоидов плато Хэвэн датированы $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ методом. Для вулканических пород других ареалов ЮБВО, данные по которым использованы с целью сопоставления, получено 6 изотопных дат, исследован минеральный состав 12 образцов и определены редкоэлементные характеристики 80 проб. Исследования проводились с использованием петрографических, микронзондовых, а также петрогеохимических и изотопно-геохимических методов по аттестованным методикам в лабораториях Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (г. Иркутск), Института земной коры СО РАН (г. Иркутск), Геологического института СО РАН (г. Улан-Удэ), Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН (г. Новосибирск) и в Байкальском аналитическом центре коллективного пользования ИНЦ СО РАН (г. Иркутск).

Научная новизна. Впервые проведены детальные геолого-геохимические и минералогические исследования базальтоидов труднодоступного неогенового вулканического плато Хэвэн в Северной Монголии и установлен временной интервал его формирования. Выделены мантийно-коровый и малоглубинный этапы кристаллизации щелочно-базальтовых расплавов, выраженные в изменении направленности эволюции составов минералов. В базальтоидах исследованных вулканических ареалов обнаружены и изучены минеральные парагенезисы с участием фельдшпатоидов – нефелинов, содалитов и лейцитов. Определены условия образования базанитовых, гавайитовых и трахибазальтовых магм плато Хэвэн. Показано, что гавайиты и трахибазальты раннего этапа, а также базаниты позднего этапа формирования плато обладают геохимическими особенностями составов, указывающими на гранат-содержащий источник магматических расплавов. Установлено, что главными условиями формирования щелочно-базальтовых магм плато Хэвэн являлись глубина магмообразования, фазовый минеральный состав и вариации степени плавления гранат-содержащей

астеносферной и литосферной мантии. Показано, что источниками щелочно-базальтовых магм плато Хэвэн являются изотопные мантийные резервуары PREMA и EMI типа.

Практическая значимость исследования заключается в возможности использования данных изотопного датирования пород плато Хэвэн и других исследованных вулканических сооружений ЮБВО в целях геологического картирования и корреляции магматических и геодинамических событий Центральной Азии в кайнозое. Петрологическое значение имеет разработка критериев выборки представительных составов базальтоидов с учетом факторов вторичных изменений и установление состава петротипического гавайита южного фланга Байкальской рифтовой зоны для использования при региональных геохимических исследованиях и моделировании магматических процессов.

Апробация результатов исследования. По теме диссертационной работы опубликовано 4 статьи, из них 2 статьи в центральных российских журналах из списка ВАК - «Доклады АН», «Геология и геофизика», и 2 статьи в зарубежном научном журнале «Mongolian Geoscientist», а также 12 тезисов докладов в материалах российских и международных конференций.

Результаты исследований докладывались на 15-ти российских конференциях и симпозиумах (ИВиС ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 2009 г.; ИЗК СО РАН, Иркутск, 2009, 2010, 2013 гг.; ИрГТУ, Иркутск, 2010 - 2013 г.г.; ИГГ УрО РАН, Екатеринбург, 2010 - 2012 г.г.; ИГЕМ РАН, Москва, 2010 г.; ИНЦ СО РАН, Иркутск, 2012 г.; ИГХ СО РАН, Иркутск, 2012 г.; ГИН СО РАН, Улан-Удэ, 2013 г.) и на 3-х зарубежных конференциях (Монголия, Улан-Батор, 2010, 2011 г.г.; Institute of Earth Sciences, Academia Sinica, Taipei, Taiwan, 2011).

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, общим объёмом 142 страницы, включая 58 рисунков, 14 таблиц и включает список литературы из 130 наименований.

Благодарности. Работа выполнена в лаборатории геохимии гранитоидного магматизма и метаморфизма отдела геохимии эндогенных процессов Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН в 2009-2013 гг. Автор выражает свою признательность коллективу лаборатории, а также сотрудникам других научных и аналитических подразделений Института за помощь и поддержку в выполнении исследований. Автор благодарит также специалистов ГИН СО РАН под руководством С.В. Канакина за помощь в проведении микрозондовых исследований и к.г.-м.н. А. В. Травина (ИГМ СО РАН) за обеспечение работ по изотопному датированию пород. Проведение экспедиционных работ и отбор представительных коллекций материалов по объектам исследования были бы невозможны без помощи и участия Митичкина М.А., Пузанкова М.Ю., Долгих С.М., Татарникова С.А., Щербакова Ю.Д. и Перепеловой А.А.. Автор благодарен сотрудникам ИГХ СО РАН А.В. Горегляду, М.Ю. Хомутовой и Л.Л. Ткаченко, а также монгольским коллегам к.г.-м.н. Д. Одгэрэл (Институт геологии и минеральных ресурсов МАН) и к.г.-м.н. Д. Бат-Ульзий (Монгольский государственный университет науки и технологий) за помощь в организации экспедиционных исследований на территории Монголии.

Автор выражает признательность докторам геолого-минералогических наук Антипину В.С., Ефремову С.В., Горновой М.А., Медведеву А.Я., Рассказову С.В., Плечову П.Ю., Макрыгиной В.А., Мартынову Ю.А., Воронцову А.А. и кандидатам геолого-минералогических наук Травину А.В., Мехоношину С.А., Колотилиной Т.Б., Чашину А.А., Щербакову В.Д. за научное сотрудничество и обсуждение материалов. Автор благодарит академика РАН М.И. Кузьмина и к.г.-м.н. С.И. Дриля за знания и опыт, полученные во время работы в составе руководимых ими лабораторий. Особую благодарность автор выражает сотрудникам ИЗК СО РАН к.г.-м.н. Демонтеровой Е.И. и д.г.-м.н. Иванову А.В. за постоянное научное общение и их непосредственное участие в выполнении экспедиционных, изотопных и геохронологических исследований по теме работы.

Автор выражает свою признательность и благодарность к.г.-м.н. Перепелову А.Б., под научным руководством которого была выполнена данная диссертационная работа.

Защищаемые положения:

1. В истории формирования плато Хэвэн выделены два этапа вулканической активности – первый, наиболее продуктивный, связан с излияниями лав гавайитов и трахибазальтов в раннем миоцене (20-17 млн. лет), второй заключительный этап характеризуется редкими излияниями лав базанитов в среднем миоцене (15.5 млн. лет). Время формирования лавового плато Хэвэн соответствует раннемиоценовому этапу и началу средне-позднемиоценового этапа развития Южно-Байкальской вулканической области.

2. Геохимические особенности базальтоидов плато Хэвэн (пониженные концентрации HREE, Y, Sc и повышенные Pb, Sr, Ba, и K) указывают на гранат-содержащий состав и относительное обогащение LILE компонентами магмообразующего мантийного субстрата. Источниками щелочно-базальтовых магм плато Хэвэн были изотопные мантийные резервуары PREMA и EM1 типа.

3. Установлены два этапа кристаллизации щелочно-базальтовых расплавов плато Хэвэн. Начальные этапы кристаллизации проходили в мантийно-коровых условиях с формированием Ol ($Fe_{0.84-0.82}$) и Sp ($T \sim 1280-1200$ °C, $P \sim 15-14$ кбар), и далее, с последовательным образованием парагенезисов вкрапленников и субфенокристаллов Ol+Crx и Ol+Crx+TiMgt±Pl ($T \sim 1250-1140$ °C, $P \sim 14-8$ кбар). Парагенезис микролитов Crx+TiMgt+Plm+Pl и интерстиционных выделений щелочных алюмосиликатов Ne+Kfs кристаллизовался в малоглубинных условиях и на стадии излияния и литификации магм ($T \sim 970-870$ °C).

4. Определены PT условия формирования базальтоидных магм плато Хэвэн в диапазоне давлений $\sim 25-15$ кбар и температур $\sim 1435-1360$ °C. Показано, что их формирование проходило на глубинах $\sim 75-40$ км в области гранат-содержащей астеносферной и литосферной мантии. Главными условиями формирования гавайит-трахибазальтовых и базанитовых расплавов плато Хэвэн являлись вариации минерального состава (Grt 3-8%) и степени плавления (0.5-2%) гранат-содержащей перидотитовой мантии, а также последовательные изменения глубины магмообразования, связанные с прогрессивной и регрессивной динамикой эволюции плюма.

Результаты проведенных исследований, обосновывающие защищаемые положения, отражены в содержании 5-ти глав диссертационной работы.

Глава 1. Геолого-структурная позиция и объекты исследований неогенового вулканизма юго-западного фланга Байкальской рифтовой зоны.

В главе рассмотрена геологическая позиция неогенового вулканизма в структуре Байкальской рифтовой зоны и Южно-Байкальской вулканической области. На основе литературных данных приведены основные положения моделей развития БРЗ в результате астеносферного диапиризма [Zorin et al., 2003; Kulakov, 2008], плюмовой тектоники [Lebedev et al., 2006; Petit et al., 2008], процессов Индо-Евразийской коллизии [Dobretsov et al., 1996] и влияния процессов субдукции Тихоокеанской плиты под Евразию [Kimura et al., 1990; Fournier et al., 2004; Зорин и др., 2006]. Изложены представления о развитии позднекайнозойского вулканизма ЮБВО в результате процессов плюм-литосферного взаимодействия во внутриконтинентальной обстановке Центральной Азии [Ярмолук и др., 2003; Коваленко и др., 2009; Kuzmin et al., 2010]. В соответствии с вулканическим районированием [Киселев и др., 1979] и тектоническими реконструкциями [Беличенко и др., 2003] показана принадлежность структуры вулканического плато Хэвэн к Прихубсугульскому ареалу и к области сочленения Хамар-Дабанского и Джидинского террейнов, аккретированных в раннем палеозое к Тувино-Монгольскому массиву (микроконтиненту) (рис. 1). В разделе «Методы исследований» приведены детальные характеристики применяемых RFA, ICP-MS и изотопных методов анализа. Даны характеристики WDS и EDS методов рентгеновского микроанализа минералов, а также общее описание метода $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ изотопного датирования пород. В разделе «Объекты исследований и фактический материал» приведены данные об объемах выполненных исследований плато Хэвэн и других модельных вулканических ареалов ЮБВО (плато Тумусун в хребте Хамар-Дабан, плато Агуйтын-нуруу в Юго-Восточном Прихубсугулье, Дархатская котловина). Даны общие сведения по их геологическому строению и вулканическим комплексам пород.

Глава 2. Геологическое строение и возраст вулканического плато Хэвэн.

В главе изложены результаты геологических исследований и изотопного датирования пород плато Хэвэн и других исследованных ареалов ЮБВО. Лавовые покровы плато Хэвэн перекрывают рифейские и венд-раннекембрийские метаморфические толщи, а также средне-верхнекембрийские и девонские гранитоидные комплексы (рис. 2). В строении вулканогенной толщи плато насчитывается суммарно более 30-ти моногенных лавовых покровов общей мощностью до 250-300 м. Мощности отдельных лавовых покровов составляют обычно 3-8 м и иногда достигают 20-25 м. Отсутствие в строении плато прижерловых брекчий, некков и пирокластических отложений свидетельствует о том, что извержения имели здесь трещинный тип и слабо эксплозивный характер. Реконструкции наклонов лавовых толщ указывают на приуроченность центров извержений к центральным и северным участкам структуры.

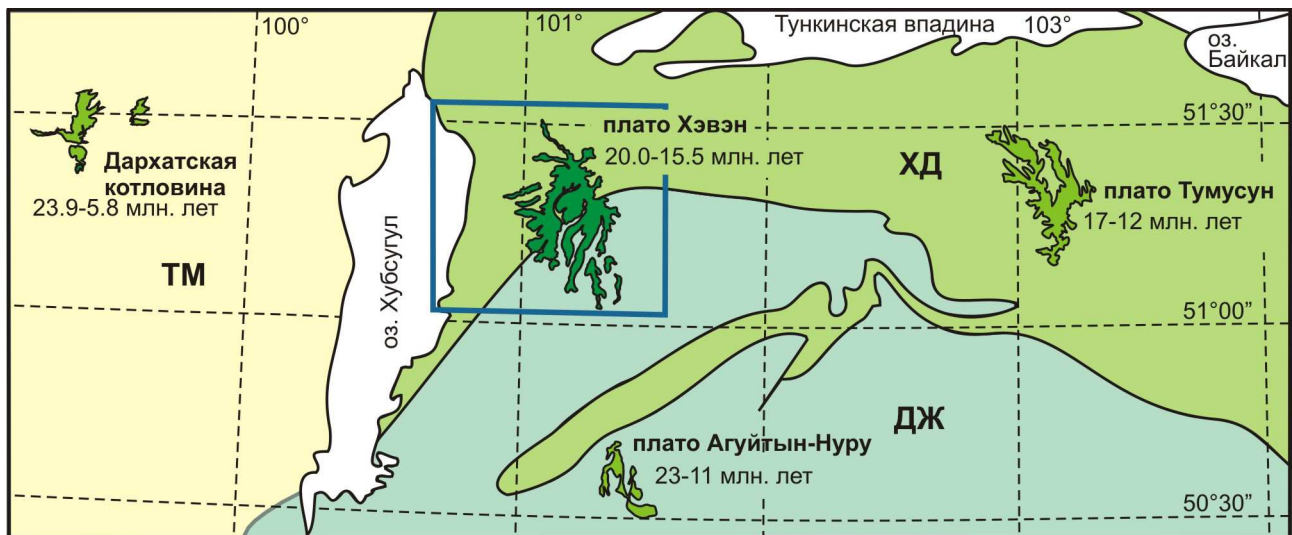


Рис. 1. Положение и возраст плато Хэвэн и других исследованных вулканических ареалов южного фланга БРЗ на тектонической схеме по [Беличенко и др., 2003].

ХД – Хамар-Дабанский и ДЖ – Джидинский террейны, ТМ – Тувино-Монгольский микроконтинент. Возраст базальтоидов Дархатской котловины по [Ярмолюк и др., 2003].

Особенности геологического строения плато Хэвэн позволяют установить, что его формирование происходило в течение двух последовательных этапов вулканической активности. Ранний этап вулканизма являлся исключительно продуктивным по объемам изверженного материала (до 100-120 км³) и представлен лавами оливин (Ol) и реже Ol-клинопироксен (Cpx) содержащих гавайитов с образованием моногенного слоистого разреза. Мощность лавовой толщи раннего этапа составляет 200-220 м. В завершение раннего этапа проявлены плагиоклаз (Pl) содержащие типы лав - трахибазальты. Второй или заключительный этап вулканизма связан с формированием единичных лавовых покровов, которые резко ограничены по площади распространения и объемам изверженного материала (до 2-3 км³). Лавы этого этапа формируют короткие и мощные покровы с хорошей морфологической сохранностью и представлены мелкопорфировыми Ol-Cpx базанитами. Суммарная мощность лавовых покровов заключительного этапа составляет не более 50-80 м.

Согласно данным ⁴⁰Ar/³⁹Ar датирования извержения первого этапа происходили в окончании раннего миоцена в диапазоне 20–17 млн. лет назад. Второй этап вулканического развития плато датирован началом среднего миоцена (~15.5 млн. лет назад). В целом, длительность формирования лавового плато Хэвэн оценивается в ~ 5 млн. лет. Другие исследованные вулканические ареалы ЮБВО (плато Тумусун, плато Агуйтын-нуруу, Дархатская котловина) демонстрируют близкие возрастные характеристики. Для вулканических толщ района плато Тумусун данные ⁴⁰Ar/³⁹Ar датирования указывают на их образование в среднем миоцене (17–12 млн. лет) и близки к полученным ранее датам [Киселев и др., 1979]. Определение возраста формирования плато Агуйтын-нуруу показало, что его развитие происходило на двух этапах – раннемиоценовом (базаниты) и среднемиоценовом (щелочные базальты, гавайиты, трахибазальты) в интервале 23–11 млн. лет. Возраст вулканогенных толщ Дархатской котловины заключен в диапазоне 23.9-5.8 млн. лет (ранний-поздний миоцен) [Ярмолюк и др., 2003].

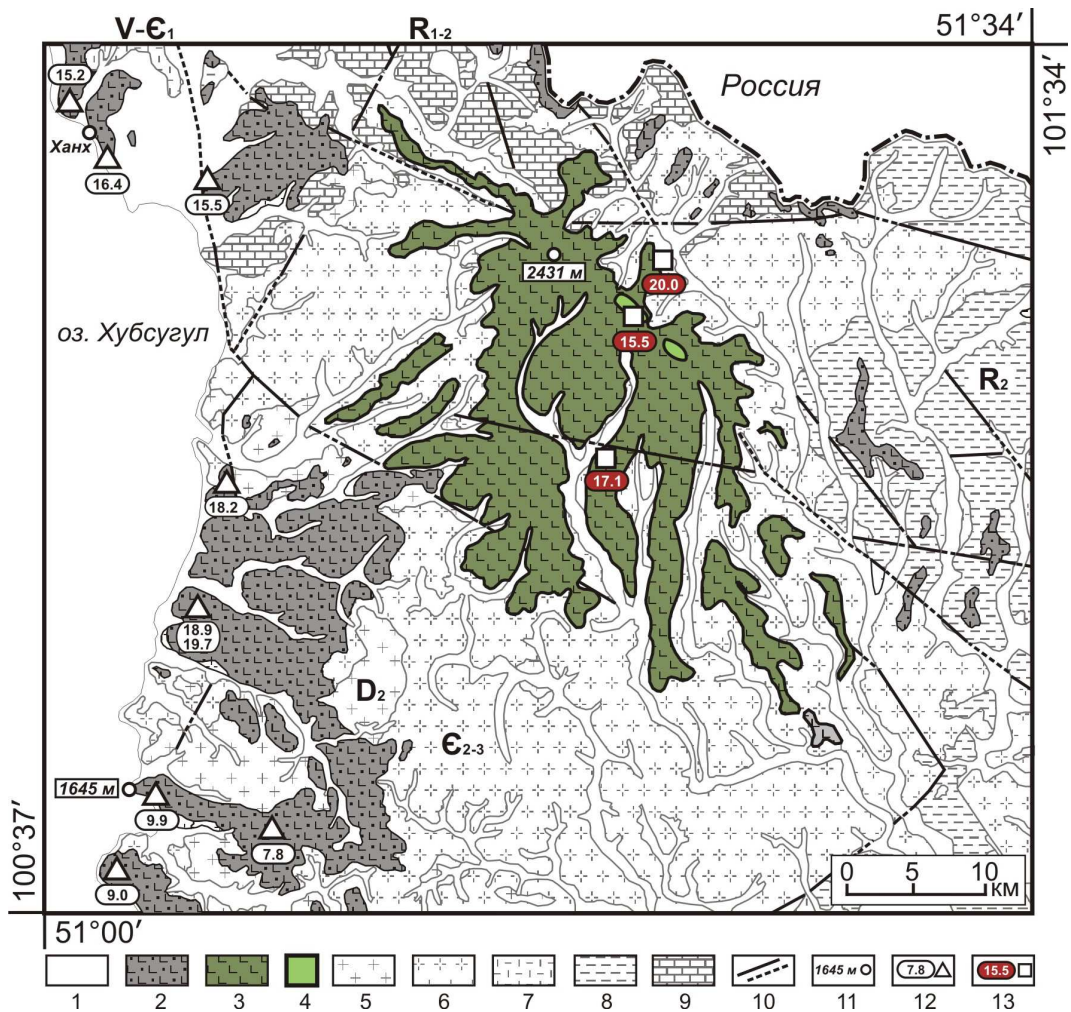


Рис. 2. Вулканическое плато Хэвэн на схеме геологического строения Восточного Прихубсугуля (Северная Монголия).

Схема составлена по геологической карте М 1:200000, лист № М-47-VI, VII [Гарваа и др., 1998]. 1 – четвертичные осадочные отложения, 2 - ранне-среднемиоценовые и средне-позднемиоценовые вулканогенные толщи, 3-4 - вулканическое плато Хэвэн (3 – гавайиты и трахибазальты 1-го этапа, 4 – базаниты 2-го этапа), 5 – среднедевонские гранитоидные комплексы, 6- средне-позднекембрийские гранитоидные комплексы, 7 – венд-раннекембрийские метаморфогенные толщи, 8 – позднерифейские метаморфические толщи, 9 – ранне-среднерифейские метаморфические толщи, 10 – разломные дислокации, установленные и скрытые, 11 – абсолютные высотные отметки, 12-13 – участки отбора образцов базальтов и результаты датирования в млн. лет: 12 - К/Аг метод [Ярмолюк и др., 2003; Rasskazov et al., 2003], 13 – $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ метод, плато Хэвэн [Перепелов и др., 2010; Tsyrukova et al., 2014].

Глава 3. Геохимия, вещественная эволюция и источники базальтовых магм плато Хэвэн.

В главе изложены основные закономерности эволюции вещественного состава базальтоидов плато Хэвэн и вопросы их классификации, по изотопным данным установлены возможные источники расплавов и проведено сопоставление геохимических характеристик пород исследованных вулканических ареалов.

На основе вещественных классификационных признаков с использованием диаграммы TAS, величин $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ и содержаний нормативных Ne и Ну показано, что базальтоиды плато Хэвэн представлены гавайитами, трахибазальтами и базанитами (рис. 3А). По петрохимическим характеристикам

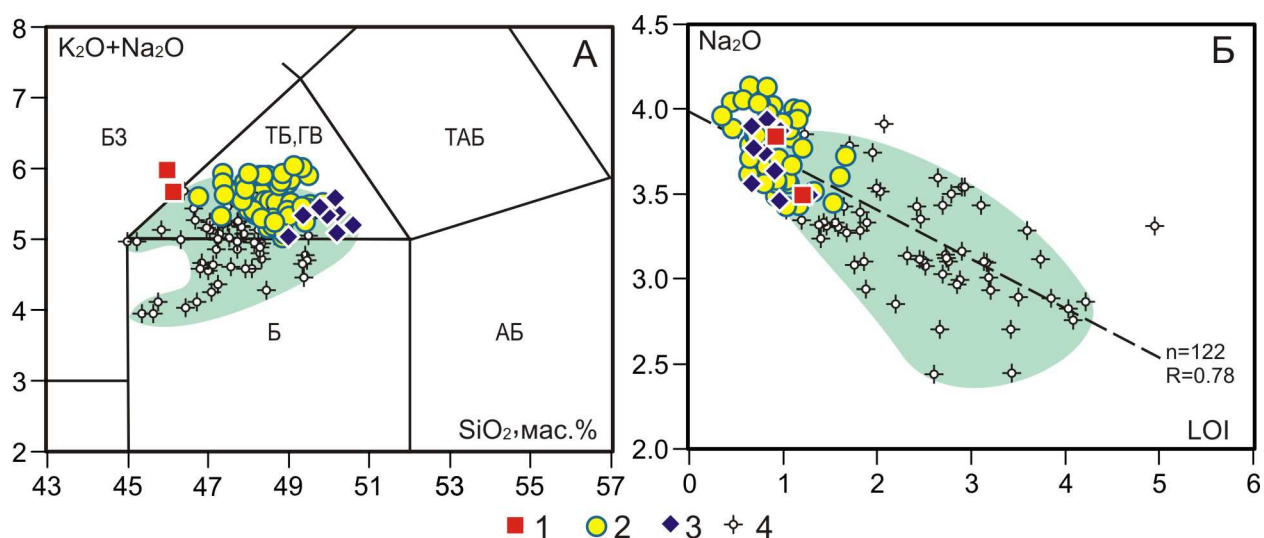


Рис. 3. Классификационная диаграмма TAS [LeBas et al., 1986] (А) и график корреляции LOI-Na₂O для составов базальтоидов плато Хэвэн (Б).

Поля составов пород: БЗ – базаниты, ТБ – трахибазальты, ГВ – гавайиты, ТАБ – трахиандезибазальты, Б – базальты, АБ – андезибазальты. Точки составов пород плато Хэвэн: 1 – базаниты, 2 – гавайиты, 3 – трахибазальты, 4 – измененные базальтоиды. R – коэффициент корреляции LOI-Na₂O. n=122 – количество проб.

они принадлежат щелочно-оливин-базальтовой серии и отвечают характеристикам примитивных мантийных магм (Mg# 0.60-0.66). В составе других исследованных вулканических ареалов, помимо указанных типов пород, установлены щелочные базальты (плато Тумусун), фонотефриты и трахиандезибазальты (Дархатская котловина).

По петрографическим данным среди базальтоидов плато Хэвэн выделена обширная группа пород, отличающаяся развитием процессов вторичных изменений – идингситизация оливина, серицитизация алюмосиликатов основной массы, окисление рудных фаз и темноцветных минералов. Составы таких пород демонстрируют статистически значимое снижение концентраций Na₂O с возрастанием потерь при прокаливании (LOI 1.22–4.95 мас.%) (рис. 3Б). Такие породы не могут быть надежно типизированы и должны быть исключены из представительных выборок.

В связи с преобладающим развитием среди продуктов вулканизма плато Хэвэн гавайитов, в специальном разделе главы приведены классификационные признаки и историческая справка о формировании термина «гавайит».

На редкоэлементных дискриминационных диаграммах (Th-Hf-Ta, Nb/Zr-Va/Zr) точки составов базальтоидов плато Хэвэн располагаются в поле базальтов внутриплитного типа (WPB). Помимо K-Na щелочной специфики, они имеют повышенные содержания TiO₂, MgO, P₂O₅, HFSE (Nb, Ta) и соответствующие значения индикаторных редкоэлементных отношений (Ba/Nb=6.6-11.5). В сравнении с гавайитами и трахибазальтами раннего этапа формирования плато, базаниты второго этапа имеют более высокие содержания TiO₂, P₂O₅, Be, HFSE, LREE, Th и U. Трахибазальты, напротив, отличаются от гавайитов и базанитов более низкими содержаниями TiO₂, MgO и ряда литофильных редких элементов. Базальтоиды плато Хэвэн обладают, в целом, примечательно слабой дисперсией составов. Тем не менее, при снижении кремнекислотности пород в диапазоне SiO₂

46-51 мас.% в направлении от трахибазальтов и гавайитов раннего этапа к базанитам второго этапа наблюдается как увеличение концентраций ряда петрогенных оксидов - TiO_2 , MgO , K_2O , P_2O_5 , так и отчетливое возрастание содержаний Be , Rb , Sr , HFSE, LREE, Th и U . Между концентрациями в базальтоидах TiO_2 , K_2O , P_2O_5 , Be , Rb , HFSE, REE (от La до Ho), Th и U обнаруживаются отчетливая прямая корреляция, но корреляция HREE (Er , Tm , Yb , Lu) и Y с петрогенными оксидами и другими редкими элементами для базальтоидов всей группы составов выражена крайне слабо. Это связывается с относительной стабильностью реститового Grt в источнике расплавов и является основанием для предположения о близком составе источника и различиях в фазовом минеральном составе и степени плавления магмообразующего субстрата при образовании трахибазальт-гавайитового ряда расплавов раннего этапа и базанитовых магм второго этапа вулканического развития плато Хэвэн.

На диаграммах распределения магматофильных элементов (рис. 4) гавайиты и трахибазальты раннего этапа близки к среднему составу ОИВ и имеют относительно более низкие концентрации Th , U , Zr , Hf , Y и HREE, а также слабо выраженные положительные аномалии для Ba , K , Pb и Sr . Базаниты в сравнении с ОИВ отличаются более высокими концентрациями K , Nb , Ta , Sr и P . В целом, по содержанию петрогенных и редких элементов гавайиты, трахибазальты и базаниты плато Хэвэн близки к их концентрациям в одноименных породах неогеновых вулканических ареалов ЮБВО по [Ярмолюк и др., 2003; Демонтерова и др., 2007], но отличаются некоторым обогащением HREE и Y от пород Южно-Хангайской вулканической области (ЮХВО) [Саватенков и др., 2010].

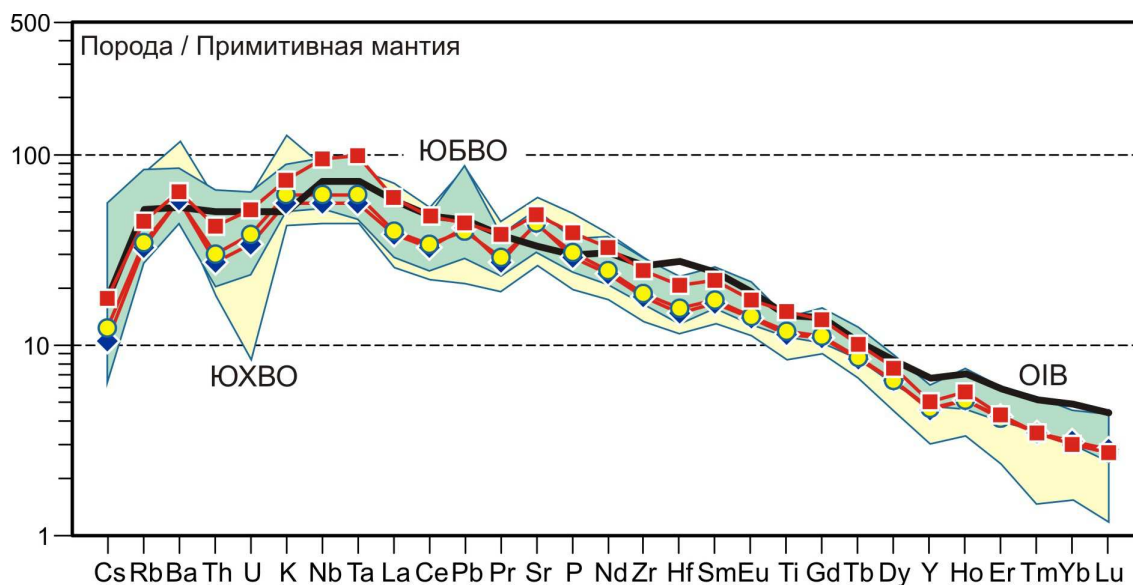


Рис. 4. Диаграммы распределения магматофильных элементов для базальтоидов плато Хэвэн и других вулканических ареалов Центральной Азии.

Содержания элементов в породах (г/т) нормированы на примитивную мантию [McDonough, Sun, 1995]. Условные обозначения точек составов пород см. на рис. 3. Графики распределения магматофильных элементов для средних составов базанитов ($n=2$), гавайитов (40) и трахибазальтов (4) плато Хэвэн. Поля составов базальтоидов Южно-Хангайской вулканической области (ЮХВО) [Саватенков и др., 2010] и Южно-Байкальской вулканической области (ЮБВО) [Демонтерова и др., 2007]. ОИВ – средний состав базальтов океанических островов [Sun, McDonough, 1989].

Приведенные в работе результаты новых геохимических исследований базальтоидов ряда вулканических ареалов ЮБВО показывают, что при сопоставлении узкого диапазона составов гавайитов ($\text{SiO}_2=46-49$, $5 \leq \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} \leq 6$ мас.% и $\text{Mg\#} > 60$) обнаруживается относительное обогащение LREE, Ba, Sr, Pb, U и обеднение HREE, Y и Sc базальтоидов плато Хэвэн и Агуйтын-нуруу (Джидинский литосферный блок) в сравнении базальтоидами плато Тумусун (Хамар-Дабанский литосферный блок) и Дархатской котловины (Тувинно-Монгольский литосферный блок) (рис. 5). Для гавайитов плато Тумусун и Дархатской котловины величины индикаторных редкоэлементных отношений составляют $\text{La/Yb}=13-17$, $\text{Dy/Yb}=2.8-3.0$, $\text{Sr/Y}=29-37$, а для гавайитов плато Хэвэн и Агуйтын-Нуруу - $\text{La/Yb}=16-23$, $\text{Dy/Yb}=3.1-3.5$, $\text{Sr/Y}=37-48$. Эти закономерности связываются с особенностями состава магмообразующего мантийного источника под исследованными вулканическими ареалами.

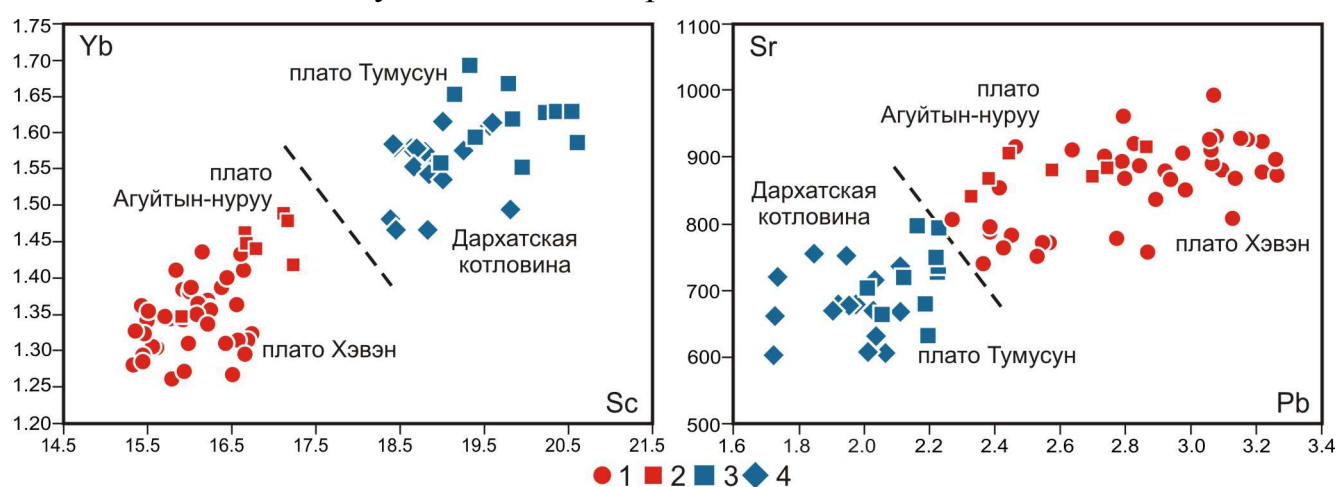


Рис. 5. Диаграмма Sc-Yb, Pb-Sr (г/г) для гавайитов плато Хэвэн и других исследованных вулканических ареалов ЮБВО.

Точки составов гавайитов: 1 – плато Хэвэн, 2 – плато Агуйтын-нуруу, 3 – плато Тумусун, 4 – Дархатская котловина.

На основе новых данных по изотопным характеристикам Sr, Nd и Pb для гавайитов и базанитов плато Хэвэн уточнена роль различных источников магм Прихубсугульского вулканического ареала. Изотопные характеристики $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ и $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ для гавайитов и базанитов плато Хэвэн находятся в пределах диапазона изотопных составов позднекайнозойских базальтоидов ЮБВО [Рассказов и др., 2002; Ярмолук и др., 2003] и смещены в направлении наименее радиогенных значений (рис. 6).

Для определения роли различных мантийных источников в происхождении базальтоидных магм плато Хэвэн проведено сопоставление их изотопных меток с данными по позднекайнозойским ареалам Южно-Хангайской вулканической области Центральной Монголии (ЮХВО) [Ionov et al., 1994; Barry et al., 2003; Саватенков и др., 2010] и ЮБВО [Рассказов и др., 2002] (рис. 6). Величины изотопных отношений $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ и $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ для гавайитов плато Хэвэн, также как и для позднекайнозойских базальтов других вулканических ареалов принадлежат к области меток, располагающихся между резервуаром PREMA и обогащенным мантийным резервуаром EM1. Они не могут быть сопоставлены с источниками HIMU или EM2 типов. Таким образом,

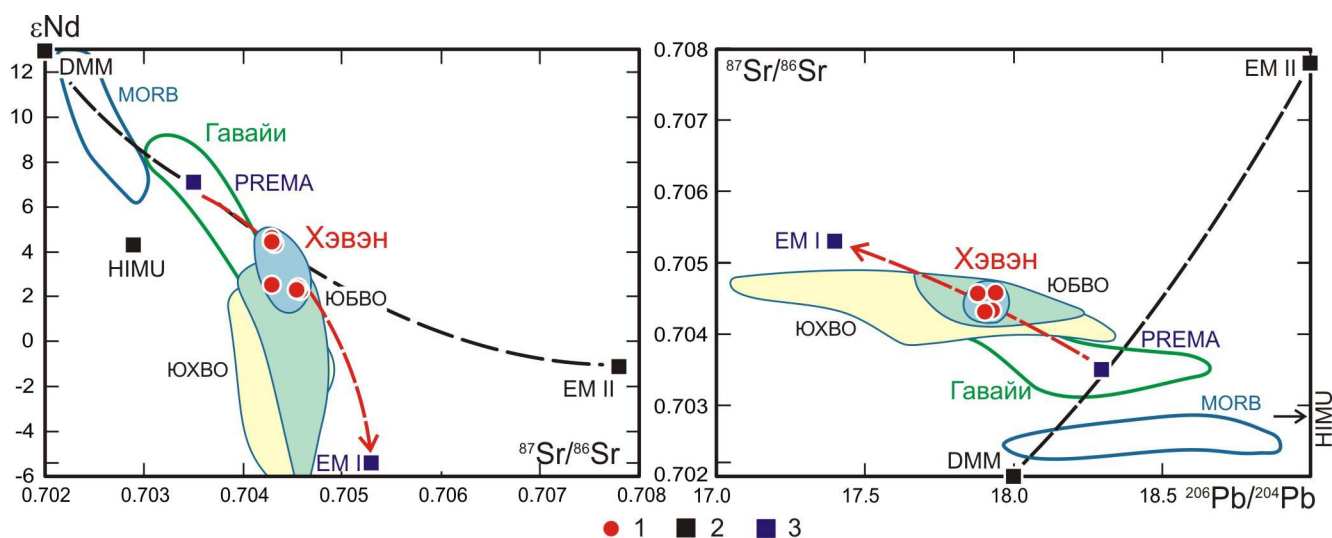


Рис. 6. Изотопные характеристики базальтоидов плато Хэвэн и других вулканических ареалов ЮБВО и ЮХВО.

Поля составов базальтоидов: плато Хэвэн (1), Южно-Байкальской вулканической области (ЮБВО) [Рассказов и др., 2002; Ярмолюк и др., 2003], Южно-Хангайской вулканической области (ЮХВО) [Barry et al., 2003; Саватенков и др., 2010], MORB и Гавайских островов [Stracke, 2012]. Мантийные резервуары (2): DMM (деплетированная MORB мантия), EM I и EM II (обогащенная мантия) и HIMU (мантия с высокими значениями $\mu = {}^{238}\text{U}/{}^{204}\text{Pb}$) по [Hart et al., 1992]; PREMA (3) (умеренно деплетированная преобладающая мантия) по [Zindler, Hart, 1986]. Пунктирными линиями показаны возможные направления взаимодействия вещества модельных источников.

главными мантийными компонентами при формировании щелочно-базальтовых магм плато Хэвэн были источники PREMA и EM I типа [Перепелов и др., 2010].

Глава 4. Минералогия и петрография базальтоидов плато Хэвэн.

В главе детально рассмотрена эволюция составов минеральных парагенезисов базальтоидов плато Хэвэн.

Базальтоиды плато Хэвэн представляют собой мелкопорфировые и редкопорфировые породы. Среди вкрапленников и субфенокристаллов в гавайитах и базанитах преобладают идиоморфные и ксеноморфные обломочные ОI. Во вкрапленниках ОI в отдельных разностях пород наблюдаются включения шпинели (Sp). Значительно более редки вкрапленники и сростки зональных Срх. Для трахибазальтов характерен Pl-содержащий парагенезис минералов вкрапленников. В основной массе пород наиболее широким распространением пользуются микролиты полевых шпатов и Срх с подчиненным количеством ОI и значительным количеством мельчайших зерен титаномагнетита (TiMgt), ильменита (Ilm) и тонкоигольчатых кристаллитов апатита (Ap). В сростании и в интерстициях между микролитами Pl отмечены анортоклазы (Anrt), K-Na полевые шпаты (Kfs), анальцимы, нефелины (Ne) и остаточное стекло (нефелиновые твердые растворы).

Наиболее магнезиальные составы ОI (Fo_{88-86}) определены в центральных зонах редких и крупных резорбированных кристаллов из гавайитов. Такие кристаллы имеют особый химизм (CaO 0.43-0.46 мас.%, NiO 0.14-0.15 мас.%) и рассматриваются как ксеногенные фазы (рис. 7). В процессах кристаллизации ОI

выделяются два этапа. Формирование основного объема вкрапленников и субфенокристаллов Ol происходило со слабым увеличением железистости минерала и содержаний CaO и MnO (Fe_{84-73} , $Tf_{0.20-0.41}$, CaO=0.17-0.39 и NiO=0.06-0.20 мас.%) (рис. 7). В завершении первого этапа кристаллизации происходит изменение направленности эволюции составов. Начинается более интенсивное увеличение железистости оливинов и содержаний в них MnO (рис. 7). Промежуточные зоны субфенокристаллов и центральные зоны микролитов имеют составы Fe_{73-65} , $Tf_{0.31-0.50}$, CaO 0.30-0.50 мас.%, а в завершение кристаллизации Ol при формировании краевых зон вкрапленников и субфенокристаллов, а также микролитов их составы принадлежат интервалу Fe_{70-40} , $Tf_{0.37-1.07}$, CaO 0.31-1.10, Zn 0.07-0.13.

Crx в базальтоидах представлены салитами и реже авгитами. Первыми кристаллизуются крупные зональные вкрапленники авгитов (Wo_{39-42} , Fs_{10-13} , TiO_2 0.72-1.06 мас.%, Al_2O_3 3.60-4.18 мас.%). Их краевые зоны, а также наиболее распространенный тип вкрапленников Crx представлены салитами Wo_{44-48} , Fs_{9-13} , TiO_2 1.33-2.44 мас.%, Al_2O_3 3.66-5.79 мас.%. При формировании их краевых зон происходит изменение направленности эволюции с интенсивным ростом содержаний Ti, Fe и Al (Wo_{45-49} , Fs_{11-16} , TiO_2 1.75-4.86 мас.%, Al_2O_3 3.70-9.88 мас.%) (рис. 7). Этот этап продолжается далее с формированием микролитов Crx - Wo_{45-49} , Fs_{13-22} , TiO_2 2.21-4.83 мас.%, Al_2O_3 2.71-11.10 мас.%. Содержания Na_2O от вкрапленников Crx к их микролитам возрастают в диапазоне 0.43 – 0.89 мас.%. Кристаллизация пироксенов заканчивается формированием в интерстициях основной массы редких и мельчайших кристаллитов эгирин-авгитов ($\leq 10-15$ мкм) с содержаниями Na_2O в диапазоне 1.97-4.95 мас.%.

Сравнение трендов изменения химизма темноцветных минералов показывает (рис. 7), что в процессе кристаллизации гавайитовых расплавов плато Хэвэн формируется более протяженный ряд составов оливинов Fe_{84-40} и пироксенов Fs_{9-22} по отношению к базанитам второго этапа. В процессе кристаллизации базанитов формируются значительно более узкие интервалы составов оливинов Fe_{79-65} и пироксенов Fs_{12-16} , а изменение направления эволюции составов от вкрапленников к микролитам выражено менее отчетливо.

Эволюция составов полевых шпатов при кристаллизации базальтоидных расплавов плато Хэвэн происходит в обычном направлении с увеличением щелочности минералов от центральных к краевым зонам вкрапленников и субфенокристаллов и далее к микролитам в диапазоне от лабрадоров до олигоклазов ($An_{65-19}Or_{1.7-12.0}$). Среди микролитов и интерстиционных выделений, кроме того, установлено развитие анортоклазов ($An_{25-3}Or_{15-37}$) и K-Na полевых шпатов ($Ab_{59-30}Or_{38-67}$).

Кристаллизация рудных минералов в базальтоидных магмах плато Хэвэн начинается совместно с Ol Fe_{84-81} . В центральных зонах таких Ol обнаруживаются хромпикотитовые шпинели с содержаниями Cr_2O_3 25-27, Al_2O_3 21-26, MgO 9-12 и TiO_2 2.8-4.7 мас.%. С оливинами Fe_{80-77} кристаллизуется шпинель Cr_2O_3 19-25, Al_2O_3 16-20, MgO 7-10 и TiO_2 5.5-6.9 мас.%, затем с оливинами Fe_{76-75} – шпинель Cr_2O_3 12-13, Al_2O_3 10-11, MgO 7.1-7.4 и TiO_2 12.3-12.5 мас.%. Далее в процессе кристаллизации шпинелей в них происходит снижение содержаний Cr, Al, Mg и

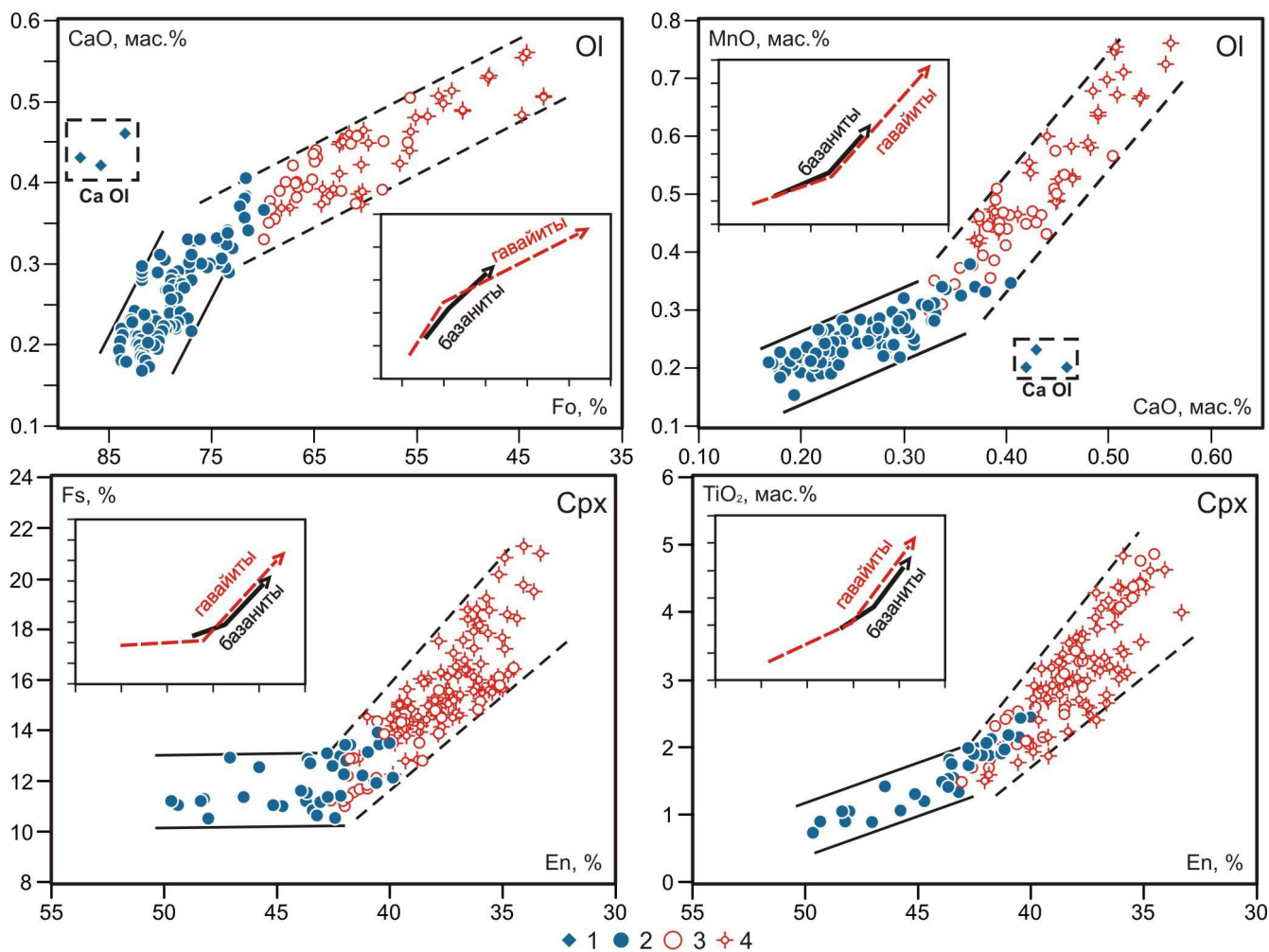


Рис. 7. Эволюция составов оливинов и клинопироксенов из базальтоидов плато Хэвэн.

Точки составов минералов: 1 – ксеногенные кристаллы, 2 – центральные и промежуточные зоны вкрапленников, центральные зоны субфенокристаллов, 3 – краевые зоны вкрапленников и субфенокристаллов, 4 – микролиты. Границы полей составов минералов: сплошные линии – этап кристаллизации в условиях литосферной мантии и коры, пунктирные линии – этап кристаллизации в малоглубинных условиях, при излиянии и литификации магм. На врезках тренды эволюции составов оливинов из гавайитов и базанитов.

рост концентраций Ti. В промежуточных и краевых зонах вкрапленников оливина Fo_{74-73} формируются Cr-Ti магнетиты - Cr_2O_3 5.8-6.2, Al_2O_3 5.0-5.2, MgO 4.5-4.8 и TiO_2 21-22 мас.%. Среди микролитов кристаллизуются исключительно TiMgt и Пт. Для микролитов TiMg характерны повышенные содержания Al_2O_3 (0.58-4.25 мас.%), MgO (0.75-3.72 мас.%) и ZnO (0.15-0.21 мас.%), а для микролитов Пт MnO (0.58-0.82 мас.%) и MgO (1.42 – 3.46 мас.%).

Таким образом, все темноцветные и рудные минералы из базальтоидов плато Хэвэн обнаруживают отчетливое изменение направления эволюции составов при кристаллизации оливинов и клинопироксенов в интервале Fo_{77-73} , Fs_{11-14} , и шпинелей со сменой парагенезиса Fo_{76-75} - Al-Cr-Mg шпинель на Fo_{74-73} – CrTiMgt. Это может свидетельствовать о реализации достаточно быстрых изменений условий формирования минеральных парагенезисов на определенном этапе кристаллизации расплавов.

По составам тонкокристаллического и стекловатого базиса основной массы базальтоидов установлено, что в процессе кристаллизации щелочно-базальтовых

магм плато Хэвэн в гавайитовых и базанитовых расплавах остаточный расплав мог приобретать фонотефритовый (Ne_N 22-7 %), а в трахибазальтовых расплавах трахиандезибазальтовый или муджиеритовый составы (Ne_N 10-0 %). Эти данные, наряду с установленным развитием в основной массе базальтоидов плато Хэвэн нефелинов и нефелиновых твердых растворов, указывают на возможность достижения в процессе кристаллизации щелочных базитовых магм кремний недосыщенных составов остаточных расплавов и на их потенциальную продуктивность в формировании дифференцированного ряда щелочных пород.

Наиболее представительные составы нефелинов (Ne) имеют характеристики $Ne_{81-80} Ks_{5-6}$. В целом среди щелочных алюмосиликатов из интерстиций преобладают водосодержащие разности, представляющие собой твердые растворы в широком диапазоне составов. Общими для них являются высокая натриевая щелочность (Na_2O от 11 до 16 мас.%).

Установлено, что снижение концентраций Na_2O в направлении возрастания LOI для базальтоидов, имеющих признаки вторичных изменений (рис. 3Б), обусловлено разрушением в основной массе пород щелочных алюмосиликатов и «нефелинового» стекла с выносом Na и формированием низкотемпературных вторичных водосодержащих минералов – цеолитов и анальцима.

Глава 5. Процессы формирования, эволюции и кристаллизации щелочно-базальтовых магм плато Хэвэн.

Глава является результирующей с изложением данных об условиях происхождения и кристаллизации базальтоидных магм плато Хэвэн и содержит описание модели магматического развития структуры. С использованием эмпирических геотермометров и геобарометров определены РТ условия формирования и начальных этапов кристаллизации базальтоидных расплавов плато Хэвэн [Putirka, 2008]. Кристаллизация вкрапленников и субфенокристаллов оливинов Fo_{84-73} в базальтоидных магмах плато Хэвэн происходила в целом в широком интервале температур $\sim 1280-1135$ °С и в условиях давлений равновесия «оливин-расплав» $\sim 16-10$ кбар. Для первого этапа развития магматической системы плато Хэвэн максимальные температуры кристаллизации и давления равновесия « Fo_{84-80} -расплав» установлены для магнезиальных гавайитов ($T \sim 1280-1200$ °С, $P \sim 16-13$ кбар). Далее в направлении к умеренно магнезиальным гавайитам и трахибазальтам этого этапа максимальные температуры кристаллизации оливинов и давления равновесия « Fo_{84-80} -расплав» закономерно снижаются ($\sim 1250-1190$ °С, $\sim 14-12$ кбар и $\sim 1220-1185$ °С, $\sim 12-10$ кбар, соответственно). Кристаллизация оливинов Fo_{79-73} в базанитах происходила при более высоких температурах и в условиях более высоких давлений равновесия ($\sim 1245-1150$ °С, $\sim 16-14$ кбар) в сравнении с условиями формирования оливинов этого ряда составов в гавайитах ($\sim 1195-1145$ °С, $\sim 14-12$ кбар) и трахибазальтах раннего этапа развития вулканического плато Хэвэн ($\sim 1160-1135$ °С, $\sim 11-10$ кбар). Кристаллизация редких и наиболее крупных зональных вкрапленников Srx ($Wo_{39-42} Fs_{10-13}$) происходила в гавайитовых магмах при температурах $\sim 1260-1230$ °С и давлениях $\sim 13-11$ кбар. Основной объем вкрапленников и субфенокристаллов Srx (Wo_{45-48}, Fs_{9-13}) был сформирован в гавайитах при $T \sim 1220-1170$ °С и $P \sim 12-8$ кбар.

Кристаллизация вкрапленников Cr_x ($\text{W}_{0.45-4.7} \text{Fs}_{12-14}$) в базанитах начинается при несколько более низких параметрах $T \sim 1175-1150$ °C и $P \sim 10-7$ кбар.

Анализ направленности и порядка кристаллизации магм плато Хэвэн показывает, что начало кристаллизации базальтоидных расплавов связано с образованием хромпикотитовой шпинели и магнезиальных ОI Fo_{84-82} в условиях достижения исходными расплавами относительно низкобарической области литосферной мантии. С началом кристаллизации ОI в результате процессов фильтрации становится возможным изменение состава магм, обусловленное задержкой подъема кристаллического компонента и более высокой подвижностью расплава. Начало формирования ОI- Cr_x парагенезиса может быть сопоставлено с подъемом расплавов на менее глубинный уровень и, судя по установленным РТ параметрам кристаллизации Cr_x , происходило, вероятно, на уровне нижней коры. Дальнейшая совместная кристаллизация ОI, Sp, Cr_x продолжается в менее глубинных коровых условиях. Примечательно наличие в процессе кристаллизации магм этапа «резкой» смены направленности изменения химизма ОI и Cr_x (рис. 7). Это согласуется с уменьшением размерности кристаллического компонента и снижением в этом направлении давлений и температур кристаллизации, а также РТ условий равновесия минералов с расплавами. Очевидно, что кристаллизация расплавов на заключительном этапе происходила в малоглубинной магматической системе с увеличением скорости подъема магм и далее при их излиянии и литификации с образованием интерстиционного парагенезиса щелочных алюмосиликатов.

Рассчитанные составы исходных расплавов обладают повышенной магнезиальностью ($\text{Mg}\# \sim 0.72$) и по классификационным характеристикам могут быть отнесены к базанитам, гавайитам и щелочным оливиновым базальтам. Установлено, что РТ условия формирования гавайитовых магм раннего этапа вулканического развития плато Хэвэн для безводной системы отвечают диапазону значений $P \sim 22-17$ кбар и $T \sim 1415-1370$ °C. Трахибазальтовые расплавы этого этапа образовались при несколько более низких значениях $P \sim 17-15$ кбар и $T \sim 1375-1360$ °C. Базанитовые расплавы второго этапа, напротив, формируются при более высоких параметрах $P \sim 25-23$ кбар и $T \sim 1435-1425$ °C.

Общая оценка степени плавления перидотитового мантийного субстрата при формировании магм плато Хэвэн выполнена на основе редкоэлементного моделирования процесса плавления Sp и Grt содержащих лерцолитов с использованием коэффициентов распределения «минерал-расплав» для системы «перидотит-расплав». Положение точек составов базальтоидов плато Хэвэн в координатах $\text{La}/\text{Sc}-\text{Sr}/\text{Sc}$, $\text{Sm}/\text{Yb}-\text{La}/\text{Yb}$ и $\text{Dy}/\text{Yb}-\text{Sr}/\text{Y}$ (рис. 8) дают основание предполагать, что гавайитовые магмы плато Хэвэн могли образоваться в перидотитовой мантии (ОI 65%, Орх 14-16%, Cr_x 11-16% Grt 3-6%, Sp 2%) в условиях ~1-2% степени ее частичного плавления. При этом базанитовые магмы плато Хэвэн формировались при степени плавления ~ 0.5-1% в условиях более высокого содержания в мантии Grt составляющей (7-9%). Эти выводы соответствуют установленным общим закономерностям эволюции составов базальтоидов плато Хэвэн, а именно увеличению концентраций в них многих некогерентных литофильных элементов в направлении от трахибазальтов и

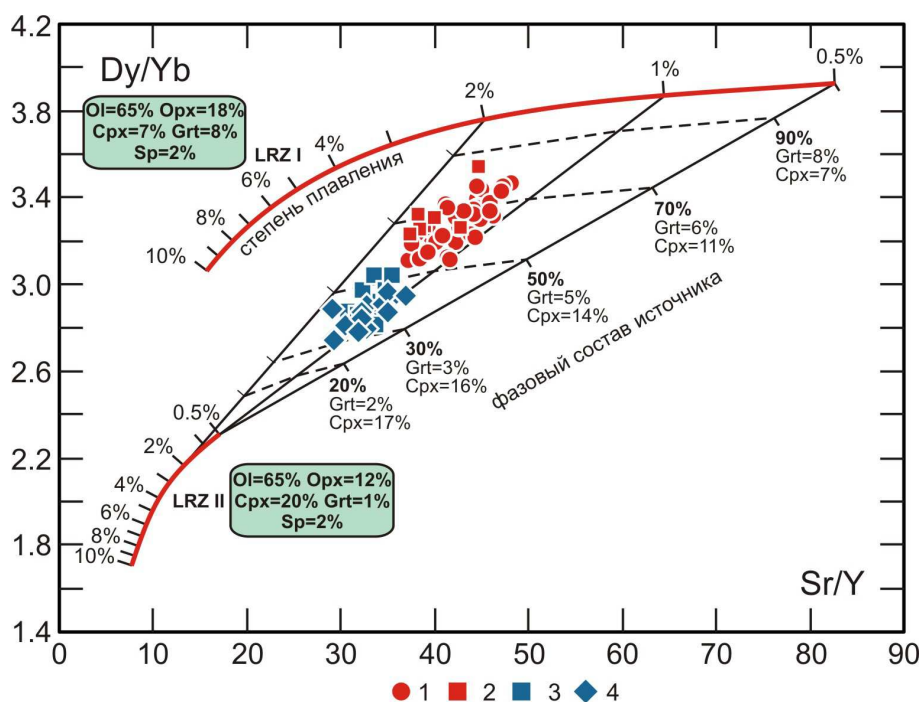


Рис. 8. Условия формирования гавайитовых магм плато Хэвэн и других исследованных вулканических ареалов ЮБВО на диаграмме Sr/Y-Dy/Yb (г/г).

Точки составов гавайитов: 1 – плато Хэвэн, 2 – плато Агуйтын-нуруу, 3 – плато Тумусун, 4 – Дархатская котловина. Для расчетов условий формирования магм использованы модельные составы лерцолитов LRZ I, LRZ II, состав лерцолитового включения из базанитов плато Тумусун и коэффициенты распределения «минерал-расплав» по [Salters, 1996; Suhr et al., 1998; Adam, Green, 2006; Elkins et al., 2008].

гавайитов раннего этапа к базанитам заключительного этапа. В отличие от магмообразующего мантийного субстрата плато Хэвэн и Агуйтын-нуруу, источники гавайитовых расплавов плато Тумусун и Дархатской котловины характеризуются меньшими содержаниями Grt компонента (2-3%).

Источники и условия формирования исходных базальтоидных магм плато Хэвэн могут быть реконструированы и согласованы с известными моделями строения литосферы южного фланга БРЗ. Предполагается, что в результате подъема мантийного плюма базальтоидные расплавы плато Хэвэн формировались в условиях астеносферной мантии, а также в области Grt фации глубинности и Sr-Grт фазового перехода литосферной мантии. Этот вывод согласуется с диапазоном значений РТ параметров формирования магм, установленных на основе расчетов эмпирических геотермобарометров, и соответствует реконструкциям строения литосферы в регионе. В условиях безводной и водосодержащей системы расчетные давления и температуры плавления при формировании магм плато Хэвэн сближаются с кривой солидуса сухого перидотита (рис. 9). Выполненные по этим данным определения глубин образования магм показывают, что гавайитовые расплавы раннего этапа формировались на уровне глубин ~ 65-50 км, а трахибазальтовые являются наименее глубинными – 50-40 км. Базанитовые расплавы образуются на глубинах 75-65 км (рис. 9).

Результаты геофизических и петрологических исследований показывают, что мощность континентальной коры на юго-западном фланге БРЗ составляет 45-

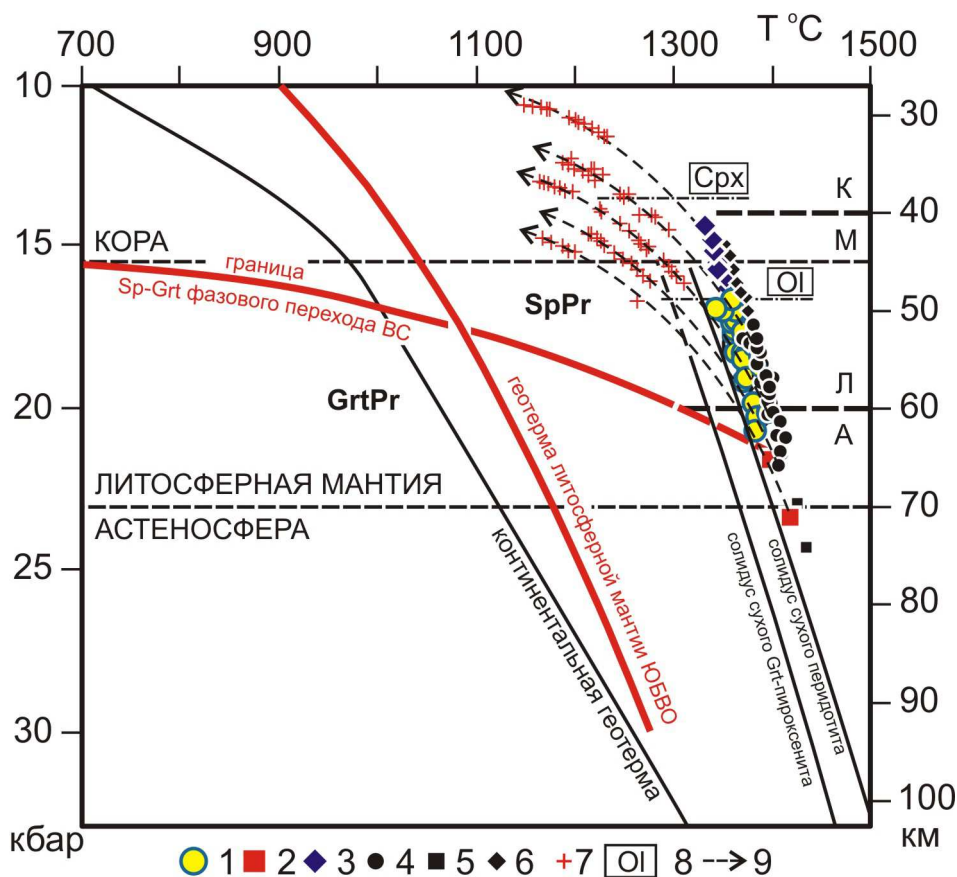


Рис. 9. РТ условия формирования и кристаллизации базальтоидных магм плато Хэвэн.

1 – РТ параметры формирования: 1 - гавайитовых, 2 - базанитовых и 3 – трахибазальтовых магм плато Хэвэн для водосодержащей системы; 4-6 – то же, для «сухой» системы; 7 – РТ параметры равновесия «оливин-расплав» для вкрапленников ОI из базальтоидов плато Хэвэн для водосодержащей системы по [Putirka, 2008]; 8 – уровни максимальных РТ параметров равновесия «минерал-расплав» для ОI и Срх; 9 – направления кристаллизации вкрапленников ОI. Геотерма литосферной мантии ЮБВО и граница раздела Sp-Grt фазового перехода для Восточного Саяна (BC) по [Litasov, Taniguchi, 2002]. Фации глубинности литосферной мантии: GrtPr – гранатового и SpPr – шпинелевого перидотита. Кривые солидуса «сухого» перидотита по [Hirschmann et al., 2000] и «сухого» Grt пироксенита по [Kogiso et al., 2003]. Кривая типичной континентальной геотермы по [McKenzie et al., 2005]. Л и А – предполагаемая область раздела литосферной (Л) и астеносферной (А) мантии под плато Хэвэн в раннем неогене. К (кора) и М (мантия) – предполагаемое положение раздела Мохо в раннем неогене. Расчет глубины формирования магм выполнен на основе установленных величин давлений, средних величин мощности коры для южного фланга БРЗ в 45 км по [Zorin et al., 2002] и оценок плотности коры 2.9 г/см^3 и мантии 3.3 г/см^3 .

50 км [Zorin et al., 2002; Мордвинова, Артемьев, 2010], граница раздела литосферной и астеносферной мантии в неогене проходила на глубинах ~70-75 км, а область Sp-Grt фазового перехода располагалась на глубине ~55-65 км [Litasov, Taniguchi, 2002]. Согласно проведенным расчетам, зона магмогенерации под плато Хэвэн в раннем неогене была разогрета примерно на ~200 °C в сравнении с обычным термическим состоянием литосферной мантии сопредельных районов ЮБВО и модельной континентальной геотермой (рис. 9). В этом случае термальный граничный слой между литосферной и астеносферной мантией мог располагаться выше, на уровне глубинности около 60 км.

Предполагается, что базальтоидные магмы плато Хэвэн образовались в процессе плюм-литосферного взаимодействия. Главными компонентами плюма являлось вещество источников PREMA и EMI. При этом вслед за [Stracke, 2012] следует заключить, что вещество плюма было неоднородно на уровне его фазового состава – кристаллического и «подвижного» флюидно-магматического компонентов, близких к составам источников PREMA и EMI. Вариации вещественного состава и повышенные содержания в породах Ba, K, Pb и Sr указывают на возможность участия в процессах магмообразования рециклированного корового вещества. Эти выводы согласуются с результатами исследований магматических ареалов ЮХВО [Саватенков и др., 2010] и некоторых других районов ЮБВО [Наумов и др., 2003; Naumov et al., 2006].

На раннем этапе магматического развития плато Хэвэн при достижении плюма области раздела литосферной и астеносферной мантии происходило «утонение» литосферы и формирование в условиях высоких потенциальных температур и относительно высоких степеней плавления значительных объемов гавайитовых и в завершение этапа трахибазальтовых магм. На втором этапе магматического развития структуры плато Хэвэн в результате снижения активности плюма происходили уменьшение степени его воздействия на литосферу и ее локальная компенсационная тектоническая деструкция. Вулканическая активность этого заключительного этапа формирования лавового плато Хэвэн связана с заглублением уровня магмообразования и редкими излияниями малых объемов базанитовых магм. Их обогащенный характер, повышенные концентрации в базанитах TiO_2 , P_2O_5 , Be, HFSE, LREE, Th и U определяется уменьшением степени плавления Grt-содержащей астеносферной мантии на фоне снижения потенциальных мантийных температур.

Следует заключить, что проявление различных по составам гавайитовых, трахибазальтовых и базанитовых расплавов в последовательном развитии локализованной вулканической системы плато Хэвэн определяется вариациями фазового состава магмообразующего мантийного субстрата, степени его плавления и изменениями условий формирования мантийных магм, связанных с прогрессивной и регрессивной динамикой плюма.

Заключение.

В результате проведенных петролого-геохимических исследований вулканического плато Хэвэн установлено, что его формирование происходило в Южно-Байкальской вулканической области на ранне-среднемиоценовом временном интервале. Показано, что происхождение базальтоидных магм этой структуры связано с процессами плавления Grt-содержащей мантии на глубинах 75-40 км в условиях низких степеней плавления. Полученные геохимические данные по вулканическим ареалам плато Хэвэн, плато Тумусун, плато Агуйтын-нуруу и Дархатской котловины демонстрируют микроэлементные вариации в составах базальтоидных магм в пределах различных литосферных блоков. Особенности составов базальтоидов плато Хэвэн заключены в относительном обогащении LREE, Ba, Sr, Pb, U и обеднении HREE, Y и Sc в сравнении с гавайитами плато Тумусун и Дархатской котловины. Эти различия, наряду с

глубиной магмообразования и степенью плавления мантийного субстрата указывают на неоднородность и значительную роль фазового минерального состава мантии в происхождении и эволюции вулканизма ЮБВО и согласуются с представлениями о реализации в этой области в неогене процессов плюм-литосферного взаимодействия. Полученные данные, наряду с другими, могут позволить проследить динамику плюмового магмогенеза в позднекайнозойской истории геодинамического развития региона. Для выполнения этой задачи необходимо усиление изотопных исследований, проведение изучения мантийных ксеногенных включений, привлечение данных по распределению редких элементов в минералах и данных экспериментальных исследований по расплавленным включениям.

Список публикаций по теме диссертации

Статьи:

1. Перепелов А.Б., Цыпукова С.С., Демонтерова Е.И., Павлова Л.А., Травин А.В., Бат-Улзий Д. Первые минералого-геохимические и изотопно-геохронологические данные по неогеновому щелочно-базальтовому вулканизму плато Хэвэн Залу Урийн Сарьдаг (Северная Монголия) // ДАН. - 2010. - Т. - 434. - № 2. - С. 232-237.
2. Tsypukova S.S., Perepelov A.B., Demonterova E.I., Pavlova L.A., Travin A.V., Puzankov M.Yu. Origin and evolution of Neogene alkali-basaltic magmas in the southwestern flank of the Baikal rift system (Heven lava plateau, northern Mongolia) // Russian Geology and Geophysics. - 2014. - V. 55. - № 2. - P 190-215.
3. Цыпукова С.С., Бат-Улзий Д., Перепелов А.Б., Демонтерова Е.И., Павлова Л.А. Результаты новых минералого-геохимических и изотопно-геохронологических исследований неогенового вулканизма Северной Монголии: плато Хэвэн // Mongolian Geoscientist. - 2010. - V. 36. - P. 50-53.
4. Цыпукова С.С., Перепелов А.Б., Демонтерова Е.И., Павлова Л.А., Травин А.В., Бат-Улзий Д. Вулканическое плато Хэвэн Залу Урийн Сарьдаг (Северная Монголия) // Mongolian Geoscientist. - 2011. - V. 37. - № 4. - P. 89-101.

Тезисы докладов:

1. Perepelov A.B., Tsypukova S.S. Late-Cenozoic hawaiiite volcanism of Kamchatka and Baikal Area – indicator of the composition and mantle metasomatism in the setting of convergent lithosphere plates and plume-lithosphere interaction // 2nd Taiwan-Russia Joint Symposium on Factors of cyclic and catastrophic changes of the lithosphere, volcanism, orogeny and cosmic events. Program and abstract volume. Institute of Earth Sciences, Academia Sinica, Taipei, Taiwan. - 2011. - P. 18-19.
2. Цыпукова С.С., Перепелов А.Б., Павлова Л.А., Демонтерова Е.И. Неогеновый щелочно-базальтовый вулканизм Северной Монголии: плато Хэвэн Залу Урийн Сарьдаг // Вулканизм и геодинамика. IV Всероссийский симпозиум по вулканологии и палеовулканологии. Материалы симпозиума. 22-27 сентября 2009 г. Петропавловск-Камчатский. - 2009. - Т. 2. - С. 542-547.
3. Цыпукова С.С., Перепелов А.Б., Павлова Л.А., Демонтерова Е.И., Митичкин М.А., Пузанков М.Ю., Перепелова А.А. Новые геолого-геоморфологические и минералого-геохимические данные о неогеновом щелочно-базальтовом вулканизме плато Хэвэн Залу Урийн Сарьдаг (Северная Монголия) // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту). Материалы научного совещания. Иркутск. - 2009. - Вып. 7. - Т. 2. - С. 138-140.

4. Цыпукова С.С., Перепелов А.Б., Демонтерова Е.И., Павлова Л.А. Вулканическое плато Хэвэн Залу Урийн Сарьдаг (Северная Монголия): минералогия, геохимия, петрология // Геология, поиски и разведка полезных ископаемых и методы геологических исследований. Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Геонауки». Иркутск. - 2010. - Вып. 10. - С. 141-145.

5. Цыпукова С.С., Перепелов А.Б., Павлова Л.А. Щелочно-базальтовый вулканизм плато Хэвэн Залу Урийн Сарьдаг (Северная Монголия): проблемы типизации и минералого-геохимические особенности пород // Магматизм и метаморфизм в истории Земли. Тезисы докладов XI Всероссийского петрографического совещания. Екатеринбург. - 2010. - Т. 2. - С. 318-319.

6. 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. Иркутск. - 2010. - Вып. 8. - Т. 2. - С. 148-151.

7. Цыпукова С.С., Перепелов А.Б., Демонтерова Е.И., Павлова Л.А., Травин А.В. Происхождение и эволюция гавайитовых магм вулканического плато Хэвэн (Северная Монголия) // Новые горизонты в изучении процессов магмо- и рудообразования. Материалы научной конференции. ИГЕМ РАН. Москва. - 2010. - С. 171-172.

8. Цыпукова С.С., Демонтерова Е.И., Перепелов А.Б. Неогеновые вулканические плато Хэвэн и Тумусун юго-западного фланга БРЗ: минералого-геохимические особенности базальтоидов как следствие условий магмообразования и гетерогенности литосферной мантии // Вулканизм и геодинамика. Материалы V Всероссийского симпозиума по вулканологии и палеовулканологии. Екатеринбург. - 2011. - С. 393-395.

9. Цыпукова С.С., Перепелов А.Б., Демонтерова Е.И. Неогеновые вулканические плато Агуйтын-Нуру, Хэвэн и Тумусун юго-западного фланга Байкальской рифтовой зоны // Материалы Всероссийского совещания «Современные проблемы геохимии», посвященного 95-летию со дня рождения академика Л.В. Таусона. Иркутск. - 2012. - Т. 2. - С. 182-185.

10. Цыпукова С.С., Перепелов А.Б., Демонтерова Е.И. Неогеновый вулканизм Хамар-Дабанского и Джидинского литосферных блоков (юго-западный фланг Байкальской рифтовой зоны): геохимия, минералогия и эволюция магм // Геодинамика, рудные месторождения и глубинное строение литосферы. Материалы Всероссийской конференции с международным участием. XV Чтения памяти академика А.Н. Заварицкого. Екатеринбург. - 2012. - С. 272-274.

11. Цыпукова С.С., Перепелов А.Б., Демонтерова Е.И., Канакин С.В., Одгэрэл Д. Неогеновый щелочно-базальтовый вулканизм Дархатской впадины (Северная Монголия): новые геолого-геохимические данные // Материалы Второго Всероссийского симпозиума с международным участием и молодежной научной школы «Континентальный рифтогенез, сопутствующие процессы». Иркутск. - 2013. - Т. 2. - С. 159-163.

12. Цыпукова С.С., Перепелов А.Б., Демонтерова Е.И., Иванов А.В., Травин А.В. Новые данные по геохимии и геохронологии щелочно-базальтового вулканизма южного фланга Байкальской рифтовой зоны // Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции «Геодинамика и минерагения Северо-Восточной Азии». Улан-Удэ. - 2013. - С. 398-401.

Подписано к печати 26.02.2014 г.
Формат 60*84/16. Объем 1,4 п.л. Тираж 120 экз. Заказ № 637.
Издательство Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН.
664033 г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1.

