

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ОРДЕНА ЛЕНИНА И ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ ИНСТИТУТ
ГЕОХИМИИ И АНАЛИТИЧЕСКОЙ ХИМИИ им. В.И.ВЕРНАДСКОГО

На правах рукописи

УДК 552.33(969+698.1):552.II:548.4

НИКОГОСЯН Игорь Кимович

ПЕТРОЛОГИЯ И ГЕОХИМИЯ ПЕРВИЧНЫХ МАГМ ТОЛЕИТОВОЙ И
СУБЦЕЛОЧНЫХ СЕРИЙ ГАВАЙСКИХ ОСТРОВОВ И о.РЕЙНЬОН

Специальность 04.00.02 - геохимия

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата
геолого-минералогических наук

Москва - 1990

Работа выполнена в ордена Ленина и ордена Октябрьской Революции
Институте геохимии и аналитической химии им.В.И.Вернадского АН СССР

Научный руководитель: кандидат геолого-минералогических
наук А.В.Соболев

Официальные оппоненты: доктор геолого-минералогических
наук Л.Н.Когарко

доктор геолого-минералогических
наук Б.П.Золотарев

Ведущая организация: Институт Геологии и Геофизики
СО АН СССР

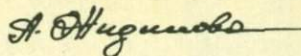
Защита состоится "23" мая 1990 г. в 10 час. 30 мин.
на заседании Специализированного совета Д.002.59.02 при Институте
геохимии и аналитической химии им.В.И.Вернадского АН СССР.

Адрес: П17975 ГСП-1, Москва В-334, ул.Косыгина, д.19

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института геохимии
и аналитической химии им.В.И.Вернадского АН СССР.

Автореферат разослан "23" апреля 1990 г.

Ученый секретарь
Специализированного совета
кандидат геолого-минералогических
наук



А. П. Жидикова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Внутриплитовый магматизм является одним из главных типов мантийного магматизма и несет прямую информацию о составе и условиях существования глубинного мантийного вещества, необходимую для построения современных геодинамических моделей. Наиболее распространенным объяснением внутриплитового магматизма является концепция фиксированных "горячих точек" (Wilson J.I., 1963, Morgan W.J. 1972), согласно которой его проявление обусловлено вертикальными мантийными струями, неподвижными относительно вышележащей литосферы, а направленное движение последней вызывает линейный характер пространственного расположения проявлений внутриплитового магматизма и закономерное омоложение его возраста. Ключевыми объектами внутриплитового магматизма на океанической литосфере являются современные вулканические центры - океанические острова. По вещественному составу этот тип магматизма представлен дифференцированными сериями различной щелочности. Из них наиболее мощные и долгоживущие проявления магматизма отвечают толеитовым и субщелочным составам. Ярким примером проявления таких серий являются вулканические центры Гавайских о-вов и о.Реюньон. Несмотря на широкую изученность этих объектов, до настоящего времени не получены общепринятые решения ряда существенных петрологических вопросов, к которым в первую очередь относятся: составы, условия образования и эволюции первичных магм указанных серий.

Цель работы заключается в решении следующих вопросов петрологии и геохимии толеитовой и субщелочных серий Гавайских о-вов и о.Реюньон.

1. Определение состава первичных магм (петрогенные элементы и элементы примеси).
2. Определение температуры и давления образования первичных магм указанных серий.
3. Определение условий эволюции первичных магм (температура, давление кристаллизации и режим летучих компонентов).
4. Оценка содержания элементов примесей в мантийном источнике.

Научная новизна состоит в следующем:

1. На основе использования комплекса методов, в том числе и прямого исследования расплавных включений, обоснован высокомагнезиальный (18-21% вес. MgO), коматитовый состав первичного расплава толеитовой серии вулкана Мауна Лоа, о.Гавайи.

1969

2. Установлена ассоциация высокомагнезиальных вкрапленников оливи-на и хромистых шпинелей для субщелочных серий о.Реуньон и Гавайских о-вов, что позволило на основе комплекса методов термобарогеохимии и математического моделирования определить высокомагнезиальный (I7-20% вес.) пикритовый (коматитовый) состав первичных расплавов этих серий.

3. На основе данных о составах первичных магм, с использованием результатов новейших экспериментальных исследований, определены температуры и давления генерации первичных расплавов толеитовой и субщелочных серий Гавайских о-вов и о.Реуньон. Полученные значения температур магмогенерации (1650⁰-1490⁰С) превышают известные до настоящего времени оценки температур образования внутриплитовых магм и являются максимальными для кайнозойской мантии в целом. Оценки давления генерации магм составили 27 \pm 5 кбар для толеитовой серии Гавайских о-вов и 35 \pm 5 кбар для субщелочных магм Гавайских о-вов и о.Реуньон.

4. На основе экспериментальных исследований, определения состава флюидных, расплавных и кристаллических включений, а также метода численного моделирования, получены оценки условий эволюции (состав расплава, температура, давление, режим летучих компонентов) первичных магм толеитовой и субщелочных серий Гавайских о-вов и о.Реуньон.

Практическая значимость работы. Полученные фактические данные об условиях образования и эволюции первичных магм представляют количественную основу для разработки моделей внутриплитового магматизма. Установлен факт сульфидной ликвиации на ранних стадиях эволюции внутриплитовых магм, который вносит новую информацию, необходимую для решения вопросов магматического рудообразования.

Фактический материал. В основу работы положен фактический материал, полученный в результате исследования образцов из коллекции г.Макдональда (Гавайский Университет), Р.Клоккиатти (Парижский Университет), а также коллекции ГЕОХИ АН СССР, любезно переданных автору д.г.-м.н. А.Я.Шараськиным, доктором Р.Клоккиатти и д.г.-м.н. Л.В.Дмитриевым, соответственно.

В работе использовано более 700 частичных и полных силикатных анализов минералов и стекол, выполненных на рентгеновском микроанализаторе с электронным зондом (ГЕОХИ АН СССР). Также использованы данные о содержаниях петрогенных элементов и 37 элементов примесей, полученных методами: инструментального нейтронно-активационного анализа (г.Сакле, Франция; ЦЛАВ ГЕОХИ АН СССР), индукционно-связанной

плазмы (г.Нанси, Франция), рентгенофлуоресцентного анализа, атомно-абсорбционного анализа (оба ЦЛАН ГЕОХИ АН СССР). Кроме того в работе использованы данные 200 термометрических и криометрических экспериментов с магматическими включениями во вкрапленниках оливина и пироксенов, а также определения спектров комбинационного рассеяния (раман-спектроскопия) представительных флюидных включений, полученных в Центре исследования геологии урана (г.Нанси, Франция). В работе также использованы доступные автору литературные источники (489) по теме работы.

Личный вклад автора. Автором самостоятельно проведены следующие работы:

- детальная петрографическая и минералогическая характеристика объектов исследования;
- термометрические и криометрические исследования магматических включений в минералах, а также все операции, связанные с диагностикой и классификацией расплавленных и флюидных включений и определением их состава;
- пробоподготовка более 700 частичных и полных микрозондовых анализов минералов и стекол и их статистическая обработка;
- анализ и обобщения полученных и литературных данных.

Апробация работы. Результаты исследований по теме диссертации докладывались на УП Всесоюзном совещании по термобарогеохимии и геохимии рудообразующих флюидов (г.Львов, 1985), на УП и УШ Всесоюзных школах по геологии морей и океанов (г.Геленджик, 1986, 1988), на Ш Тихоокеанской школе по морской геологии, геофизике и геохимии (г.Владивосток, 1987), на XII, XIV и XVI семинарах по геохимии магматических пород (г.Москва, ГЕОХИ АН СССР, 1986, 1988, 1990).

Материалы диссертации опубликованы в 5 печатных работах.

Структура и объем работы. Работа состоит из 6 глав, введения и заключения. В введении дается общая характеристика работы. В первой главе проводится краткий литературный обзор по теме диссертации, ставится задача исследования и обосновывается выбор объектов. Во второй главе описываются методы решения поставленных задач. В третьей главе описываются петрогеохимические особенности исследуемых образцов. Четвертая глава посвящена минералогическим исследованиям. В пятой главе приводятся результаты исследования магматических включений в минералах. В шестой главе освещены петрологические выводы на основе полученных результатов. Каждая глава завершается краткими выводами

ми.

Текстовой материал изложен на 140 страницах, проиллюстрирован 50 рис., 18 таблицами и 2 фототаблицами фотоприложения. Список литературы включает 489 наименований.

Автор выражает глубокую признательность научному руководителю кандидату геолого-минералогических наук А.В.Соболеву. Искренне благодарен автор докторам геолого-минералогических наук Л.В.Дмитриеву, А.Я.Шараськину, Р.Клоккиатти за предоставленный материал, кандидату физ.-мат. наук Н.Н.Кононковой за качественный анализ на микроанализаторе. Кроме того автор выражает благодарность сотрудникам лаборатории магматических и метаморфических пород ГЕОХИ АН СССР за постоянную помощь и поддержку в работе. О.А.Дуканину за ценные замечания по материалам диссертации.

Глава I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МАГМАТИЗМА ГАВАЙСКИХ О-ВОВ И О.РЕЙНЬОН: ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ (ПО ЛИТЕРАТУРНЫМ ДАННЫМ)

Гавайские о-ва и о.Рейньюн являются ярким примером проявлений внутриплитового магматизма толеитового и субщелочного типа. Вместе с подводными продолжениями указанные о-ва представляют собой глобальные структуры протяженностью до 6000 км (Императорско-Гавайская цепь) и до 5000 км (о.Рейньюн - Деканские трапши), с возрастом до 70 млн. лет и до 65 млн. лет, соответственно. В данных структурах наблюдается хорошая зависимость возраста от линейного расстояния до современных вулканов Питон де ля Фурнеез (о.Рейньюн) и Килауза (о.Гавайи). Вулканизм Гавайских о-вов включает четыре стадии эволюции, которые характеризуются различными составами пород, скоростями накопления и извержения магм, различными составами и распространением ксенолитов (Clague D.A., 1987), из которых щитовая (вторая) стадия имеет толеитовый состав и составляет более 95% от общего объема вулканизма Гавайских о-вов. О.Рейньюн представлен океанитовыми сериями субщелочных пород вулканов Питон де Неж (2-0,43 млн. лет) и Питон де ля Фурнеез (от 0,36 млн. лет - активен в настоящее время). Гавайский магматизм традиционно подразделяется на вулканические серии на основе щелочности и основности лав: толеитовая, субщелочная (промежуточная между толеитовой и щелочно-базальтовой), щелочно-базальтовая, базанитовая и нефелинит-меллитовая. Геохимические исследования последних лет (Budahn J.R., Schmitt R.A., 1985, Clague D.A., 1987 и др.) показывают, что вулканические породы Гавайских о-вов обогащены не-

совместимыми литофильными элементами (Rb, Sr, Ba, ЛРЗЭ, Zr, Hf, Nb, Th, Ta и др.) относительно базальтов срединно-океанических хребтов (СОХ). В свою очередь существует тенденция последовательного обогащения ЛРЗЭ с повышением щелочности пород. Эта тенденция наблюдается на каждом индивидуальном вулкане Гавайских о-вов от толеитов (щитовой стадии) через щелочные составы (дощитовой и пост-щитовой стадии) до высокощелочных составов (пост-эрозивной стадии).

Изотопный состав Sr, Nd, Pb, He (Stille P. et al., 1983, Heger E. et al., 1986) указывает на участие, как минимум трех разобогатенных мантийных резервуаров в образовании мантийного источника Гавайских о-вов. Во-первых, примитивный недегазированный мантийный резервуар, близкий к первичному мантийному веществу; во-вторых, существенно дегазированный и обедненный резервуар, близкий к источнику толеитов океанических рифтов, и, в-третьих, менее определенный резервуар, совмещающий характеристики деплетированности по изотопным системам Nd, He, Pb с признаками некоторой обогащенности по изотопной системе Sr, который интерпретируется как океаническая литосфера.

Продукты вулканизма о.Рейньон, как показали геохимические исследования (Fisk M.R., Upton B.G., Ford C.E., 1988 и др.), также характеризуются обогащением несовместимыми литофильными элементами относительно базальтов СОХ. Изотопные характеристики Sr, Nd, Pb указывают, что мантийным источником магматизма о.Рейньон может быть относительно однородный и близкий к первичному мантийному веществу резервуар с некоторой степенью обедненности. По данным изотопии He в магматизме Гавайских о-вов и о.Рейньон устанавливается отчетливое влияние недегазированного мантийного резервуара.

Наряду со значительной изученностью магматизма Гавайских о-вов и о.Рейньон, прежде всего в области вулканологии, петрохимии и геохимии, существует ряд важных петрологических вопросов, по которым существуют взаимоисключающие точки зрения. К ним относится, во-первых, определение состава первичного состава указанных серий. Литературные оценки содержания MgO в первичных расплавах варьирует от 10% вес. до 24% вес. (Wright T.L., 1984, Л.Н.Когарко, 1986, Wilkinson J.F.G., Hensel H.D., 1988 и др.) для толеитовой серии Гавайских о-вов, и от 10% вес. до 17% вес. (Л.Н.Когарко, 1986, Fisk M.R. et al., 1988, Albarede F., Tamagnan V., 1988 и др.) для субщелочной серии о.Рейньон. Во-вторых, определение условий образования и ранней эволюции первич-

ных магм. Достоверными являются лишь минимальные оценки по давлению (17-27 кбар), полученные на основе исследования ксенолитов (Clagua D.A., 1987) и данных по сейсмологии (Klein F.M., 1982). Для условий кристаллизации минимальные оценки давлений установлены по плотности флюидных включений в минералах - 6 кбар (Roedder E., 1965). Оценки температуры (Yoder H.S., Tilley C.E., 1962, Sobolev A. et al., 1983, Fisk M.R. et al., 1988), летучести кислорода (Sato M., Wright T.L., 1966, Evans B.W., Wright T.L., 1972, Nativel P., 1978, Sobolev A. et al., 1983, Кадик А.А., Луканин О.А., 1986), содержание летучих компонентов (Sobolev A. et al., 1983, Byers C.D. et al., 1985 и др.) также относятся к уровню дифференцированных магм. В-третьих, оценки состава мантийного источника, которые по литературным данным для одного и того же типа магматизма варьируют от обогащенного до обедненного (Wright T.L., 1984, Budahn J.R., Schmitt R.A., 1985, Когарко Л.Н., 1986, Albareda F., 1988) вещества. Анализ приведенных данных указывает на необходимость более точного и достоверного определения состава первичных магм исследуемых серий. Действительно, определение условий образования и эволюции первичного расплава невозможно без знания его состава. Без решения этого вопроса также затруднительно оценить состав мантийного рестита и степень плавления мантийного источника.

С нашей точки зрения главной причиной нерешенности этого вопроса является отсутствие специальных исследований, направленных на определение первичных ликвидусных ассоциаций и обоснования, таким образом, расчетных составов первичных расплавов, а также прямых определений первичных расплавов. В частности, в работах, использовавших для определения состава первичного расплава состав наиболее магнезиального оливина, присутствующего в породе, не решен принципиальный вопрос о его магматической природе (не ксеногенном происхождении), кроме того недостаточна статистика опробования, а в работах по оценке первичного расплава по модельному составу оливина мантийного источника недостаточно обоснован выбор состава такого оливина в ряду широкого диапазона возможных составов (87-94%, Arai S., 1987). Вышесказанное привело к постановке задач исследования.

Глава 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методы исследования магматических включений
Экспериментальные методы

По материалам работ (Соболев А.В., 1983; Соболев А.В., Слущкий А.Б., 1984), исследовавших влияние на температуру гомогенизации ($T_{\text{гом}}$) расплавленных включений в оливинах обмена веществом (Fe и Mg) между включением и внешней средой, а также различия во внешнем давлении во время кристаллизации в природе и в термометрическом эксперименте, следует, что различия между $T_{\text{гом}}$ первичных расплавленных включений и температурой их кристаллизации, обусловленные названными эффектами, находятся для исследованных объектов в пределах 10–15°C.

Для оптических исследований термометрии расплавленных включений в минералах была использована малоинерционная высокотемпературная (до 1700°C) установка, созданная А.Б.Слущким и А.В.Соболевым. Аппаратура позволяет производить эксперименты с минералами любой железистости и при визуальном наблюдении под микроскопом до температур 1700°C в любом режиме нагрева (охлаждения) вплоть до закалки. С учетом погрешности калибровки температуры, градиента температур в рабочей зоне и фактора нестабильности температуры, общая погрешность измерения температуры на данной аппаратуре оценивается не более $\pm 10^\circ\text{C}$.

Проводились серии кинетических экспериментов, позволяющих разработать оптимальную методику термометрического исследования расплавленных включений в минералах исследуемых пород. Установлено, что оптимальной скоростью нагрева является 5–6 град/мин. В расплавленных включениях во вкрапленниках оливина образцов субщелочных серий наблюдалось увеличение температуры гомогенизации (до 50°C) от продолжительности эксперимента (более 10 минут) при температурах выше 1200°C. Как показано в работе (А.В.Соболев, 1985), этот процесс может быть объяснен диссипацией H_2O в закрытых расплавленных включениях, которая выражается в диффузии H_2 из включения и окислении расплава в нем по реакции:

$\text{H}_2\text{O} + 2\text{FeO} = \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2$. Вышесказанное обусловило ограничение продолжительности экспериментов при температурах выше 1200°C до 10 минут.

Расчетные методы

Использованы методы расчета состава первичного расплава, предложенные

нные в работах (А.В.Соболев, А.Б.Слущкий, 1984; А.В.Соболев и др., 1988). Первый метод основан на расчете исходного расплава оливиновых кумулатов с входными данными: валовый состав кумулатов, составы железистого, среднего и наиболее магнезиального оливина, степень окисления железа в расплаве. Расчет производится методом шагового растворения равновесного оливина (шаг 0,1% вес.) в расплаве, отвечающем по составу основной массе, равновесной с наиболее железистым оливином. Второй метод отличается от предыдущего тем, что расчет производится обратным ходом фракционирования оливина от состава известного расплава (состав стекла в гомогенизированном расплавленном включении, природное стекло). Входными данными для второго метода являются: состав расплава, состав оливина, до равновесия с которым производится расчет, степень окисления железа в расплаве. В качестве модели, описывающей равновесие расплава и оливина, применялась модель (Ford C.E. et al, 1983) Отношение Fe^{2+}/Fe^{3+} в расплаве рассчитывалось на основе отношений Fe^{2+}/Fe^{3+} в шпинелях и экспериментальных данных (Maurel C., Maurel P., 1982).

Фугитивность кислорода определялась по методу А.А.Борисова, 1987 на основе равновесия шпинель-расплав (Maurel C., Maurel P., 1982) и температуры их равновесия, рассчитанной по модели (Ford C.E. et al, 1983).

Методы исследования вещественного состава

Для определения вещественного состава минералов и расплавленных включений использовался рентгено-спектральный анализ на рентгеновских микроанализаторах с электронным зондом типа "Hitachi-XMA-5B" и "САМЕВАХ-microbeam" (оба ГЕОХИ АН СССР). Состав флюидных включений определялся методом раман-спектроскопии на раман-спектрометре типа "Microdil -28" (г.Нанси, Франция), а также с использованием традиционного криометрического метода на установке системы В.А.Симонова (ИГиГ СО АН СССР).

Глава 3. ПЕТРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДУЕМЫХ ОБРАЗЦОВ

Для решения задач настоящего исследования, а именно, определения состава, условий образования и эволюции первичных магм были выбраны следующие породы: пикриты (Н-1, Н-0С) толеитовой серии вулкана Мауна Лоа Гавайских о-вов, анкарарит (С-209) субщелочной серии вулкана Ма-

уна Кеа Гавайских островов и пикриты (Рю-7в, Рю-7у, Рю-II, ОРФ) субщелочной серии вулкана Питон де Неж о.Реюньон. При выборе образцов учитывались следующие критерии: во-первых, их представительность для толеитовой и субщелочных серий указанных объектов. Во-вторых, высокая магнезиальность образцов и минимальное содержание в них несовместимых элементов по отношению к магмам этих серий. В-третьих, наличие вкрапленников оливина и хромшпинелида, являющихся потенциальными представителями первичных ликвидусных ассоциаций. В качестве материала сопоставления с учетом тех же критериев, были отобраны образцы Гавайских о-вов щелочно-базальтовой серии вулкана Уалалаи, базанитовой серии вулкана Гонолулу и нефелинитовой серии вулкана Гонолулу, соответственно, щелочной оливиновый базальт (С-220), базанит (С-163), нефелинит (С-195). Еще одним типом образцов для исследований явились дунитовые ксенолиты, установленные в примитивных лавах вулкана Уалалаи, о.Гавайи (НХ-1801) и вулкана Питон де ля Фурнеез, о.Реюньон (Рю-4а, Рю-4б, Рю-4в), как возможные представители мантийных фаз или ранних стадий фракционирования магм данных серий.

Петрографические, петрохимические и геохимические исследования отобранных образцов позволили сделать следующие выводы:

1. По петрохимии и геохимии редких элементов они представляют главные типы серий исследуемых объектов (рис. 1а,б) и отвечают наиболее примитивным, малодифференцированным разностям указанных серий.

2. По содержаниям несовместимых элементов все исследуемые образцы отвечают внутриплитовому типу магматизма и характеризуются положительной корреляцией щелочности и степени обогащенности несовместимыми элементами.

3. На основании La/Sm отношений сделан вывод о близости дунитового нодуля вулкана Уалалаи, о.Гавайи к ассоциируемым с ним базальтам щелочно-базальтовой серии, а дунитовых нодулей вулкана Питон де ля Фурнеез, о.Реюньон к ассоциируемым с ними лавами субщелочной серии.

4. На основании петрографических исследований видно, что исследуемые нами образцы лав являются порфирowymi разностями с преобладанием вкрапленников ассоциации оливин-хромшпинелид.

По сумме признаков исследуемые нами образцы отвечают критериям представительности, наибольшей магнезиальности и примитивности (по содержаниям несовместимых элементов) и, в целом, могут быть использованы для решения поставленных задач.

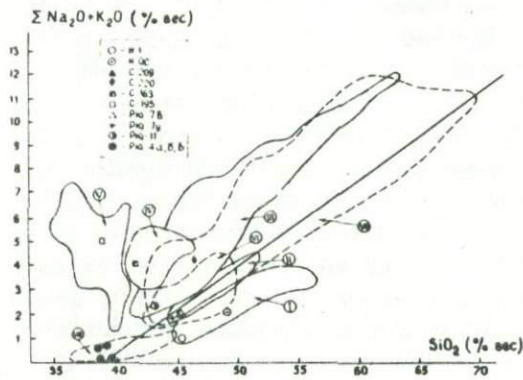


Рис.1а Составы исследованных серий и образцов Гавайских о-вов: I - толеитовая, II - субщелочная, III - щелочно-базальтовая, IV - базанитовая, V - нефелинитовая (по данным Macdonald G.A., Katsura T., 1964, Clague D. A., 1987, Clague D.A., Frey F.A., 1982 и др.) и о.Реюньон: VI - океанитовая серия, VII - дифференцированная серия вул. Питон де Неж, VIII - ксенолиты вул. Питон де ля Фурнеез (по данным Nativel P., 1978 и др.)

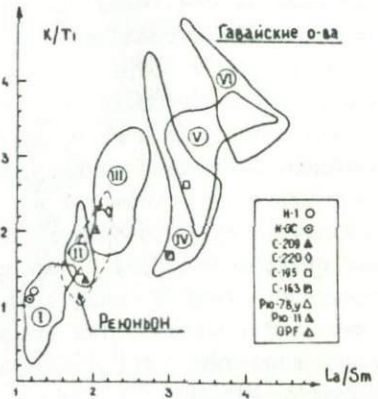


Рис.1б Геохимические характеристики исследованных серий и образцов. Полями оконтурены составы пород главных вулканических серий Гавайских о-вов: I - толеитовая, II - субщелочная, III - щелочно-базальтовая, IV - базанитовая, V - нефелинит-мелилитовая и о.Реюньон - VI (по данным Frey F.A., 1982, Hofmann A. W. et al., 1978, Clague D.A., 1987, Fisk M. et al., 88 и др.). Отношение K/Ti и La/Sm нормализовано по Sun S.S., McDonough, 1988

Глава 4. МИНЕРАЛОГИЯ ВКРАПЛЕННИКОВ ИССЛЕДУЕМЫХ ОБРАЗЦОВ

Главной задачей здесь явилось установление составов наиболее ранней, первичной ликвидусной ассоциации каждой исследуемой серии и доказательство ее нексеногенного происхождения.

Хромшпинелид-оливиновый парагенезис вкрапленников

Оливин является преобладающей фазой парагенезиса (до 99% от общего объема минералов парагенезиса). Вкрапленники оливина представлены однородными по составу идиоморфными кристаллами средних (0,25–1 мм), иногда крупных размеров (0,4–1,3 см). Установлены следующие интервалы магнезиальности вкрапленников оливина в образцах Гавайских о-вов: толеитовая серия $F_0 = 90,2-77,9\%$ мол.; субщелочная серия $F_0 = 88,00-84,1\%$ мол.; щелочно-базальтовая $F_0 = 85,5-74,7\%$ мол.; базанитовая серия $F_0 = 90,5-80,2\%$ мол.; нефелинитовая серия $F_0 = 89,3-82,3\%$ мол.; и в образцах субщелочной серии о.Реюньон $F_0 = 90,6-83,0\%$ мол. Полученные результаты подтвердили ранее известный по литературным данным интервал составов вкрапленников оливина для толеитовой, субщелочной и щелочно-базальтовой серий Гавайских о-вов, в то время как для базанитовой и нефелинитовой серий Гавайских о-вов, а также субщелочной серии о.Реюньон расширили этот интервал в более магнезиальную область (рис.2а). В целом, магнезиальные составы оливина исследуемых образцов всех серий, за исключением щелочно-базальтовой Гавайских о-вов, находятся в пределах магнезиальности оливина мантийных ассоциаций (87–92% мол., Arai S., 1987).

Сравнительные оценки состава вкрапленников оливина с оливинами типичных мантийных ксенолитов (рис.2б) показали, что в поле составов последних попала только магнезиальная область (90,5–88,0% мол.) оливина (С-163) базанитовой серии Гавайских о-вов.

Хромшпинелид составляет около 1% объема минералов парагенезиса. Встречается в виде: 1) монокристаллических включений в оливине; 2) захваченных фаз в аномальных расплавных включениях в оливине; 3) самостоятельных вкрапленников в основной массе. Результаты анализа показали, что: 1) хромшпинелиды исследуемых серий характеризуются существенно повышенными содержаниями Ti и Fe^{3+} относительно хромшпинелидов, встречаемых в шпинелевых абиссальных перидотитах; 2) существует зависимость увеличений глиноземистости и титанистости хромшпинелида от увеличения щелочности пород, в которых он содержится; 3) хромшпинелиды субщелочных серий Гавайских о-вов и о.Реюньон идентичны по составам. Результаты сопоставления составов оливина и ассоциирующего с ним хромшпинелида показали хорошую корреляционную зависимость между составами оливина и хромшпинелида, заключенного в них,

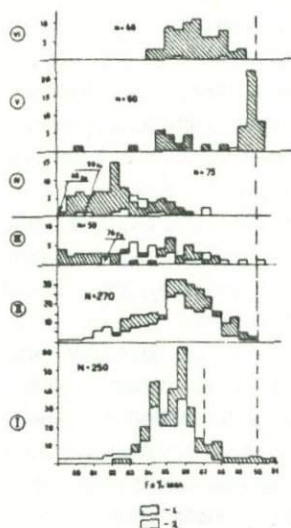


Рис.2а Гистограмма составов вкрапленников оливина в исследуемых образцах: I - (Рю-7в, Рю-7у, ОРФ), II - (Н-1, Н-0С), III - (С-209), IV - (С-220), V - (С-163), VI - (С-195)

I - материалы автора, 2 - литературные данные по соответствующим сериям (по данным Maaløe S., 1982, 1988, 1989 и др.)

а именно, уменьшение Cr_2O_3 , $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$, MgO при почти одинаковом Al_2O_3 и слабом росте TiO_2 с уменьшением магнезиальности оливина всех исследуемых серий.

Следует отметить, что хромшпинелид-оливиновые ассоциации исследуемых серий по сумме признаков (содержания CaO в оливине, содержания

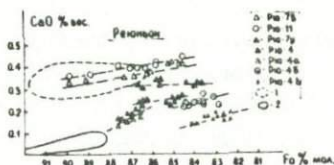
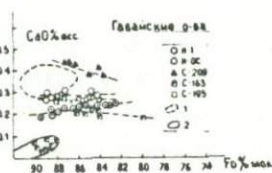


Рис.2б Составы вкрапленников оливина в исследуемых образцах. Оконтурены поля составов оливинов в базальтах СОХ (1) (Sobolev A., Tsameryan O.P. et al., 1989) и мантийных ксенолитах (2) (Herwig et al., 1986)

TiO_2 и Fe_2O_3 в хромшпинелидах, наличие первичных расплавленных включений во вкрапленниках оливина и хромшпинелида) не могут быть интерпретированы как продукты дезинтеграции типичных мантийных нодулей. Исключением является магнезиальный оливин базанитовой серии Гавайских о-вов (рис.2б).

Пироксены. Все вкрапленники клинопироксена исследуемых образцов толеитовой, субщелочной, щелочно-базальтовой и нефелинитовой серий Гавайских о-вов представлены авгитом. Наблюдается зависимость увеличения Wo -составляющей от увеличения щелочности пород. По составам исследуемые клинопироксены попадают в поля составов соответствующих серий Гавайских о-вов, известных в литературе. Наблюдается идентичность в составах клинопироксенов субщелочных серий Гавайских о-вов и о.Реюньон. Вкрапленники ортопироксена в пикрите (Н-1) представлены гиперстеном и расширили интервал составов, известных в литературе в более магнезиальную область. Ассоциация клинопироксена и ортопироксена в пикрите (Н-1) толеитовой серии вулкана Мауна Лоа, о.Гавайи, позволила на основе метода (Lindsley D.H., 1983) оценить температуру их кристаллизации, близкой к $1200^{\circ}C$.

Глава 5. ИССЛЕДОВАНИЯ МАГМАТИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ ВО ВКРАПЛЕННИКАХ МИНЕРАЛОВ

Первичные (захваченные на стадии кристаллизации) магматические включения во вкрапленниках минералов исследуемых образцов представлены следующими типами: стекловатые и частично раскристаллизованные расплавленные включения, кристаллические включения, сульфидные глобулы, флюидные и комбинированные включения. Оптическими наблюдениями этих включений во вкрапленниках оливина и определением их состава установлено, что на ранних стадиях кристаллизации система состояла из следующих фаз: оливина, хромшпинелид, силикатный расплав, флюид и сульфидный расплав. Для толеитовой серии вулкана Мауна Лоа, о.Гавайи в ходе кристаллизации к ликвидусным фазам присоединяется ассоциация ортопироксена и клинопироксена, а для субщелочной серии вулкана Мауна Кеа, о.Гавайи, ассоциация клинопироксена и плагиоклаза.

Термометрические исследования включений в минералах проводились по методике, описанной в гл.2. Методом гомогенизации первичных расплавленных включений в минералах установлены следующие интервалы температур кристаллизации: оливина пикрита толеитовой серии Гавайских о-вов $T =$

1350⁰-1250⁰С, ортопироксены и клинопироксены того же образца - $T = 1220^0-1180^0\text{C}$ и $T = 1200^0-1160^0\text{C}$, соответственно; оливины океанита той же серии $T = 1310^0-1240^0\text{C}$; оливины анкарамита субщелочной серии вулкана Мауна Кеа, о.Гавайи $T = 1305^0-1260^0\text{C}$; оливины пикрита субщелочной серии о.Реюньон $T = 1345^0-1235^0\text{C}$. Результаты анализа независимых критериев точности определения температур представлены на рис.3. На основе сравнений температуры гомогенизации с расчетными температурами, полученными в результате применения двухпироксенового геотермометра (Lindsley D.H., 1983), установлено отсутствие систематических погрешностей в определении температур кристаллизации в пределах точности геотермометра ($\pm 50^0\text{C}$) (рис.3а). Сопоставление температуры гомогенизации с температурами, рассчитанными по составу расплава (Ford C.E. et al., 1983, Nelson R.L., Drake M.J., 1979), позволило сделать вывод о достижении равновесия между расплавом и фазой минерала-хозяина (рис. 3б). Сильные корреляционные зависимости между температурами гомогенизации включений и составом вмещающего минерала свидетельствует об отсутствии случайных погрешностей определения температур кристаллизации, превышающих $\pm 20^0\text{C}$ (рис.3в).

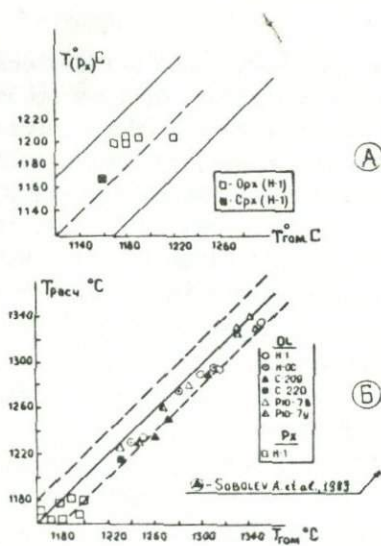
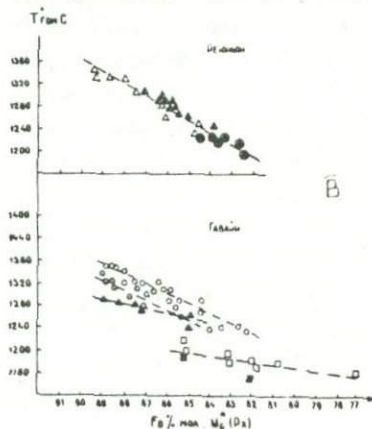


Рис.3. Зависимости температур гомогенизации расплавных включений с расчетными температурами (см. текст) (а, б) и с магниезиальностью вмещающего минерала (в)



Состав расплавных включений

Гомогенизированные включения. Составы расплавных включений, закаленных в процессе термометрического эксперимента, позволили сделать следующие выводы: 1) составы расплавов толеитовой серии Гавайских о-вов и субщелочных серий Гавайских о-вов и о.Реюньон находятся на едином оливиновом тренде с породами соответствующих серий (рис.4); 2) изменение состава расплава контролируется кристаллизацией оливина и затем клинопироксена для субщелочных серий Гавайских о-вов и о.Реюньон (рис.4а) и оливина, пироксенов и плагиоклаза для толеитовой серии Гавайских о-вов (рис.4б); 3) наблюдается близость в составах расплавов субщелочных серий Гавайских о-вов и о.Реюньон, которые, в свою очередь, отличаются от толеитовой серии Гавайских о-вов более высокими концентрациями K_2O , TiO_2 , CaO , Al_2O_3 и более низкими SiO_2 ; 4) наиболее магнезиальные расплавы, полученные методом гомогенизации расплавных включений во вкрапленниках оливина, содержат MgO : для толеитовой серии вулкана Мауна Лоа, о.Гавайи - 13,9% вес., для субщелочной серии вулкана Мауна Кеа, о.Гавайи - 11,9% вес., для субщелочной серии вулкана Питон де Неж, о.Реюньон - 14,1% вес.

Стекловатные включения во вкрапленниках хромшпинелида были обнаружены в пикрите толеитовой серии вулкана Мауна Лоа, о.Гавайи. Так как кристаллизация оливина в расплаве, захваченном хромшпинелидом, происходит по всему объему включения, в отличие от расплавных включений в оливине, где кристаллизация происходит на стенках включения, состав такого включения может быть близок к составу захваченного расплава, даже в случае его полной или частичной кристаллизации. С помощью электронно-зондового микроанализатора получены данные о составе этих включений. Исследования включений в отраженном свете показали, что они мелко раскристаллизованы в виде структуры типа спенифлекс. Анализ проводился широким зондом. По составам эти включения отвечают трендам составов вулканических пород толеитовой серии вулкана Мауна Лоа, о.Гавайи, а также составам гомогенизированных включений в оливинах пикрита этой серии. Особо следует обратить внимание на новый результат в настоящей работе, а именно, весьма магнезиальный состав ($MgO = 18\%$ вес.) расплава толеитовой серии Гавайских о-вов. Расплав такого состава для Гавайских о-вов и внутриплитовых магм в целом определен впервые.

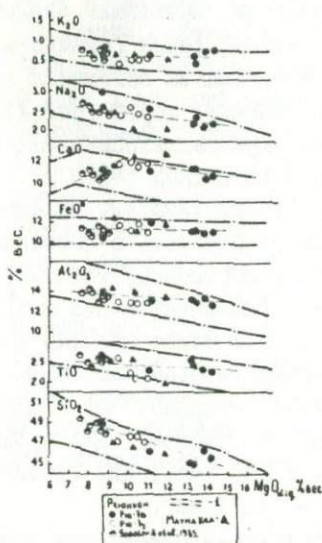


Рис.4а Состав расплавных включений во вкрапленниках оливина исследуемых образцов субщелочных серий о.Реюньон и вулкана Мауна Кеа. I - поле составов пород о.Реюньон (Fisk M.R. et al., 1988)

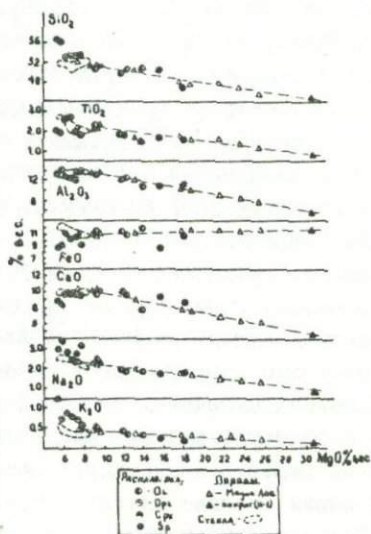


Рис.4б Состав расплавных включений и пород толеитовой серии вул. Мауна Лоа. Породы по данным (Maaloe S. Hansel V., 1982 и др.). Оконтурены составы стекол вулкана Мауна Лоа (Byers C.D. et al., 1985 и др.)

Состав флюидных включений

Во вкрапленниках оливина всех исследуемых образцов установлены первичные флюидные включения. На основе данных криометрии и раман-спектроскопии установлено, что главным компонентом флюидной фазы в системе является CO_2 . Минимальные оценки давления кристаллизации определены методом изохор (Ермаков Н.П., Долгов Ю.А., 1979) и составляют для толеитовой - 1,3 кбар, субщелочной серии - 3,5 кбар, щелоч-

но-базальтовой - 5 кбар, нефелинитовой серии - 3,5 кбар, субщелочной серии о.Реюньон - 1,5 кбар, в дунитовом нодуле Гавайских о-вов - 6 кбар, о.Реюньон - 3,5 кбар. Методом раман-спектроскопии во флюидной фазе установлено присутствие примесей летучих компонентов, а именно, H_2O , в количестве 1,5% мол. (толеитовая серия Гавайских о-вов), 0,6% мол. (субщелочная серия о.Реюньон); SO_2 в количестве 0,4% мол. (дунитовый нодуль о.Гавайи); CO в количестве 1,6% мол. (щелочно-базальтовая серия Гавайских о-вов). Также установлено проявление реакции магнезиального оливина и углекислотного флюида с образованием магнетита и клиноэнстатита во флюидных включениях в оливине из дунитовых нодулей о.Реюньон.

Глава 6. ПЕТРОЛОГИЯ ПЕРВИЧНЫХ РАСПЛАВОВ ИССЛЕДУЕМЫХ СЕРИЙ

Под первичным подразумевается расплав, не подвергнувшийся изменениям в составе после равновесия с мантийным веществом. Критерии первичности расплавов, прежде всего, вытекают из модели вещества, равновесного с этим расплавом. Многочисленные исследования ксенолитов в кимберлитах и щелочных базальтах показали, что мантийное вещество может быть представлено достаточно широким спектром пород, от ультраосновных (гарцбургиты, лерцолиты) до основных (экогиты). Так как одним из основных отличий этих пород является содержание в них магнезиального оливина и следовательно, их магнезиальность, то наиболее общим критерием выбора мантийного вещества можно считать оценки магнезиальности первичных расплавов или их ликвидусных фаз. В частности, наличие высокомагнезиальных оливинов в ликвидусных ассоциациях пород изучаемых нами серий позволило нам принять в качестве основы перидотитовую модель источника. Как показывают экспериментальные данные (Takahashi E., Kushiro I., 1983, Jagues A.L., Green D.H., 1980), в случае выбора перидотитовой модели источника, первичный расплав, образованный при равновесии с таким веществом при высоких давлениях, всегда будет иметь оливин в качестве первой или одной из первых ликвидусных фаз при давлениях ниже давлений равновесия. Поскольку по данным (Takahashi E., Kushiro I., 1983, Fallon T.J., Green D.H., 1987, 1988) коэффициент распределения Mg и Fe между оливином и расплавом мало чувствителен к изменениям температуры и давления, следовательно состав ликвидусного оливина расплава можно принять в качестве критерия первичности последнего.



В работе использованы два основных подхода к оценке первичного ликвидусного оливина: во-первых, в качестве оливина, равновесного с первичным расплавом, принимается установленный для этой серии наиболее магнезиальный оливин, но в данном случае будет обеспечена лишь минимальная оценка магнезиальности, поскольку нельзя исключить возможность сепарации более раннего оливина при фракционировании расплава на глубине. Второй, традиционный подход основан на равновесии первичного расплава с оливином остаточного вещества. Однако, в пределах перидотитовой модели состав оливина предполагаемого остаточного вещества меняется в довольно широком интервале: от 94 до 86% мол. F_0 (Arai S., 1987) для перидотитов в целом, и от 93 до 87% мол. F_0 (Sen G.A., 1983) для перидотитовых ксенолитов в Гавайских лавах, в частности, это обусловило необходимость применения дополнительных критериев. В качестве такого критерия была привлечена общемантийная корреляция между магнезиальностью оливинов и хромистостью ассоциирующих шпинелей в гранатовых перидотитах, представленная в работе (Arai S., 1990). Были использованы данные экстраполяции в поле мантийной корреляции зависимостей между магнезиальностью оливинов и хромистостью ассоциирующих шпинелей в исследуемых нами сериях. Однако, как показано в работе (А.В.Соболев, Л.В.Данюшевский, 1990), хромистость шпинели, равновесной с расплавом заданного состава, является убывающей функцией давления. Учитывая данную поправку на хромистость шпинели, вызываемой разницей между давлением выплавки и кристаллизации (около 20 кб), для всех исследуемых нами серий хромистость шпинели в релите составляет около 40% мол. Результаты графических сопоставлений позволили предположить следующие интервалы состава оливина, который мог быть равновесен с первичными расплавами исследуемых серий. В качестве нижней оценки магнезиальности ликвидусного оливина нами принят $F_0 = 91\%$ мол., который соответствует нижнему пределу магнезиальности оливина в поле мантийной корреляции для данного уровня хромистости шпинели, и вместе с этим близок к реально установленным составам наиболее магнезиального оливина в породах этих серий. В качестве верхней оценки магнезиальности ликвидусного оливина нами принят $F_0 = 92,5\%$ мол., оцененный по осевой части мантийной корреляции для данного уровня хромистости шпинели.

Определение состава первичных расплавов

На основе указанных интервалов состава ликвидусного оливина рассчитаны первичные расплавы для толеитовой серии Гавайских о-вов и субщелочных серий Гавайских о-вов и о.Реюньон. Расчет производился по двум методам: 1) по методу моделирования обратного хода фракционирования оливина от составов расплава, соответствующих составам гомогенизированных включений в наиболее магниезальных оливинах; 2) методом оценки состава первичного расплава оливинового кумулята (см. гл.2). Результаты обоих методов для главных петрогенных элементов согласуются в пределах 5% относительных. Полученные составы для толеитовой серии Гавайских о-вов относятся к группе коматитов (18-21% вес. MgO) по классификации, представленной в работе (Arndt N.T., Nisbet E.G., 1982) и хорошо согласуются с независимо определенным расплавом коматитового состава (18% вес. MgO), установленного в виде включения в шпинели. Составы субщелочных магм относятся к группе пикрит-коматитов (17-20% вес. MgO) с относительно повышенной щелочностью. Результаты оценок составов первичных расплавов представлены в таблице I.

Условия кристаллизации первичных расплавов исследуемых серий

Температура кристаллизации первичных расплавов может быть оценена двумя независимыми методами: 1) на основе определения температуры гомогенизации первичных расплавных включений в минералах (гл.5); 2) на основе моделирования фракционной кристаллизации по методу, описанному в гл.2. Расчет производился с учетом давлений, оцененных по флюидным включениям (гл.5). Сравнение результатов показывает хорошую сходимость оценок температур, полученных обоими методами (рис.5). На основе согласованных расчетных и экспериментальных данных приняты следующие интервалы кристаллизации расплавов: для толеитовой серии Гавайских о-вов - $T = 1450^{\circ} - 1180^{\circ}C$ (оливин), $T = 1220^{\circ} - 1150^{\circ}C$ (пироксены); для субщелочной серии Гавайских о-вов - $T = 1395^{\circ} - 1190^{\circ}C$ (оливин); субщелочная серия о.Реюньон - $T = 1390^{\circ} - 1170^{\circ}C$ (оливин).

Давление кристаллизации исследуемых расплавов оценено на основе определения плотности и состава флюидных включений, захваченных в магниезальных вкрапленниках оливина соответствующих серий. Такие оценки уже приведены в гл.5. Так как мощность океанической коры для Га-

Таблица I

Составы первичных расплавов

	1		2		3	
Tl C	1518	1614	1554	1652	1560	1664
Ta C	1474	1552	1490	1572	1500	1584
P kb	22	31	30	40	30	40
SiO ₂	49.2	48.4	45.8	45.5	46.2	45.7
TiO ₂	1.4	1.3	1.8	1.7	2.0	1.8
Al ₂ O ₃	10.2	9.3	11.1	10.2	11.3	10.2
FeO	11.4	11.0	11.2	11.0	11.5	11.2
MgO	17.9	21.0	16.5	19.5	17.1	20.2
CaO	7.8	7.1	11.0	10.1	9.3	8.5
Na ₂ O	1.7	1.5	1.7	1.6	2.0	1.8
K ₂ O	.32	.29	.51	.47	.59	.54
Fo	.910	.925	.910	.925	.910	.925
T C	1408	1459	1394	1452	1410	1464
Cs ppm	.06	.05	.05	.05	.22	.20
Rb	5.6	5.0	6.4	5.9	12.6	11.5
Ba	68	62	168	155	104	95
Th	.41	.37	1.15	1.06	1.70	1.55
U	.14	.13	.32	.29	.38	.35
K	2680	2420	4006	3678	4701	4280
Nb	10	9	20	19	21	19
Ta	.48	.43	1.24	1.14	1.34	1.22
La	6.51	5.88	14.42	13.24	15.33	13.95
Ce	14.03	12.66	34.90	32.04	37.99	34.59
Sr	226	204	410	376	291	265
P	803	725	1421	1305	1494	1360
Sm	3.31	2.99	4.62	4.25	4.94	4.50
Zr	95	86	123	113	152	139
Hf	2.51	2.27	3.65	3.35	4.07	3.71
Eu	1.39	1.26	1.91	1.75	1.92	1.75
Ti	8804	7948	12525	11499	12530	11408
Tb	.53	.48	.65	.60	.72	.65
Y	20	18	20	19	24	21
Yb	1.60	1.44	1.41	1.30	1.73	1.58

Примечание: 1 - толеитовая серия Гавайских о-вов; 2 - субщелочная серия Гавайских о-вов; 3 - субщелочная серия о.Рейньон

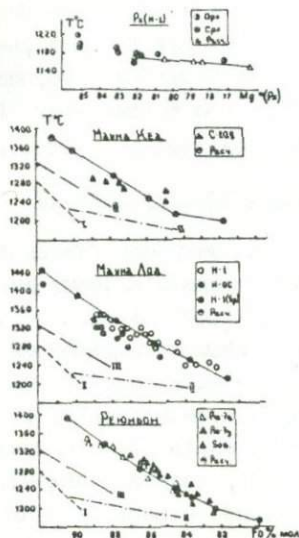


Рис. 5. Температуры кристаллизации минералов исследуемых образцов. Расч. - температуры рассчитанные фракционированием от первичных расплавов. Температуры кристаллизации оливина в расплавах ТОР-1 (I) и ТОР-2 (II) (Соболев А.В. и др., 1988) и Исландии (Гуренко А.А. и др., 1988)

вайских о-вов и о.Рейньон составляет 15-20 км, можно сделать вывод, что кристаллизация толеитовых и субщелочных магм происходила в коровых условиях, а для магм щелочно-базальтовой серии Гавайских о-вов оценки давлений соответствуют уровню границы кора-мантия.

Содержания летучих компонентов

Содержание H_2O в исследуемых расплавах, оцененное на основе составов флюидных включений и модели растворения (Burnham C.W., 1979), составляет 0,3-0,5% вес. в толеитовой серии Гавайских о-вов и около 0,5% вес. для субщелочной серии о.Рейньон, что согласуется с литературными данными о содержании H_2O в стеклах соответствующих составов (Byers C.D. et al., 1985). Минимальные содержания CO_2 , определенные по флюидным включениям и моделям растворения (Spera F.G., Bergman S.C. 1980, Spera F.S., 1984), составляют 0,1-0,15% вес. для толеитовой серии Гавайских о-вов и 1% вес. для субщелочных, щелочных и нефелиновых серий.

Летучесть кислорода оценивалась по модели А.Борисова на основе хорошо выраженных зависимостей между Fe^{2+}/Fe^{3+} в шпинелях с составами

ассоциирующих оливинов, экспериментальных данных по равновесию шпинель-расплав и температуры их равновесия. Полученные результаты показали, что оценки f_{O_2} для поздних стадий фракционирования исследуемых нами магм достаточно близки между собой и находятся в интервале гипотетических буферов $QFM - NiNiO$. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами, известными в литературе (Кадик А.А., Луканин О.А., 1986, Evans B.W., Wright T.L., 1972, Nativel P., 1978).

Условия образования первичных расплавов

Давление определялось с использованием экспериментальных данных по частичному плавлению мантийного вещества при различных давлениях методом "сэндвича" (Jagues A.L., Green D.H., 1980, Fallon T.J., Green D.H., 1987, 1988, Fallon T.J. et al., 1988). Оценки давлений проводились путем нанесения полученных нами первичных составов на проекции из вершин диопсид и плагиоклаз общепринятого базальтового тетраэдра $Ol - Di - Pl - SiO_2$, на которых были нанесены результаты экспериментальных данных, указанных выше. Погрешность в определении давлений предложенным методом, оцененная на основе сравнений экспериментальных данных разных авторов, составила 3 кбар при давлениях ниже 30 кбар. Оценки давлений исследуемых нами серий составили, 27 ± 5 кбар для толеитовой серии и 35 ± 5 кбар для субщелочных серий.

Температура последнего равновесия первичных расплавов с остаточным мантийным веществом рассчитывалась на основе наклона ликвидуса, составляющего $5^\circ C/кбар$ для оливинсодержащих систем (Takahashi E., Kushiro I., 1983). Минимальная поправка на давление вычислялась исходя из предположения адиабатической декомпрессии первичного расплава с адиабатическим градиентом $3^\circ C/кбар$ (Nisbet E.G., 1982). Таким образом полученные оценки температур равновесия первичных расплавов с мантийным веществом соответствуют: $1680^\circ - 1470^\circ C$ для толеитовой серии Гавайских о-вов, $1650^\circ - 1490^\circ C$ для субщелочной серии Гавайских о-вов и $1660^\circ - 1500^\circ C$ для субщелочной серии о.Рейньон. Следует отметить, что полученные оценки температуры образования исследованных магм (более $1500^\circ C$) значительно превышают предыдущие оценки, известные в литературе как для Гавайских о-вов, так и для внутриплитового магматизма в целом.

Летучесть кислорода начальной стадии кристаллизации первичных расплавов исследуемых серий оценивалась вышеуказанным методом по модели А.А. Борисова. Полученные оценки находятся ниже и вблизи гипотетическо-

го буфера OFM.

Оценка состава мантийного источника толеитовой и субщелочных магм Гавайских о-вов и о.Рекньюн

Состав мантийного вещества в отношении несовместимых элементов определялся на основе: 1) составов первичных мантийных расплавов; 2) оценки составов рестита после вылавок магм; 3) оценки степеней частичного плавления мантийного субстрата.

Оценки содержаний несовместимых элементов в первичных расплавах (рис. 6а) проводились методом наименьших квадратов, исходя из содержаний этих элементов в исследуемых породах соответствующих серий.

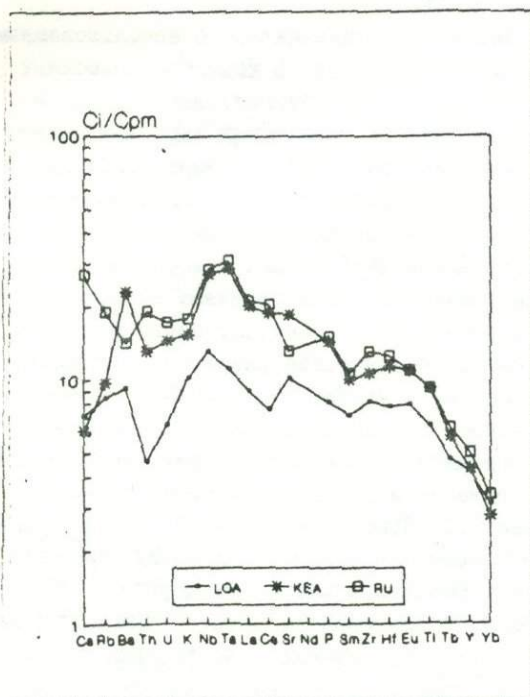


Рис. 6а. Спайдер-диаграмма содержаний несовместимых элементов первичных расплавов. Содержания нормированы к составу первичной мантии по (Sun S. S., McDonough, 1988)

Δ

Оценка степени плавления субстрата проводилась с использованием

метода, предложенного (Chen C.-Y., 1988). Метод основан на эмпирической калибровке уравнений распределения Na_2O и K_2O между расплавом и ультраосновной ассоциацией. Для реализации этого метода, кроме содержаний щелочей в расплаве, необходимо представление о вариациях суммы щелочей в потенциальном мантийном источнике. Как показывают литературные данные, с учетом деплетированных вариантов, сумма щелочей источника лежит в интервале 0,2–0,7% вес. (Chen C.-Y., 1988). Для более точного ограничения пределов рассчитанных степеней плавления использовался анализ результатов недавних экспериментов по плавлению двух контрастных мантийных составов, а именно, Гавайского пиролита и Т0-перидотита, приведенные в работах (Jaguas A.L., Green D.H., 1980, Fallon T.J. et al., 1983). Обобщение полученных результатов дает следующие оценки степеней плавления: для толеитовой серии Гавайских о-вов 34–20%, для субщелочной серии Гавайских о-вов 34–8%, для субщелочной серии о-ва Реюньон 30–7%.

Оценка состава мантийного вещества производилась с использованием вышеуказанных параметров по модели плавления. В качестве возможных фаз рестита разных моделей принимались – гарцбургит:оливин (70%) и ортопироксен (30%) для толеитовых магм и гранатовый лерцолит:оливин (60%), ортопироксен (20%) и клинопироксен (10%), гранат (10%) для субщелочных магм. Коэффициенты распределения несовместимых элементов в системе кристалл–расплав использовались на основании работ (Irving A.J., 1978, Л.Н.Когарко, И.Д.Рябчиков, 1983, Budahn J.R., Schmitt R.A., 1985). Полученные данные для толеитовых магм отвечают области обогащенного вещества (рис. 6б) и близки к оценкам, полученным в работе (Л.Н.Когарко, 1986). Отмечаются систематические различия с результатами расчетов, полученных в работах (Wright T.L., 1984, Budahn J.R., Schmitt R.A., 1985), которые связаны с различиями в оценке состава и степеней плавления: 40% плавления и рестит дунитового состава (Wright T.L., 1984), 3% плавление и рестит отвечающий составу гранатового лерцолита (Budahn J.R., Schmitt R.A., 1985). При расчете оценок состава мантийного вещества субщелочных серий учитывался целый ряд возможных составов рестита, а именно, гарцбургит – для максимальных степеней плавления; гранатовый лерцолит – для минимальных оценок степеней плавления (рис. 6в). Решения для верхних пределов степеней плавления относятся к области обогащенного мантийного вещества и подтверждают оценки (Albarede F., Tamagnan V., 1986). Решения для низких пределов степеней плавления относятся к области, близкой

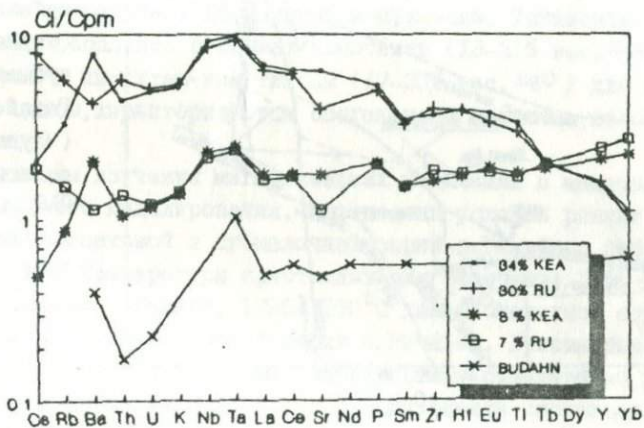
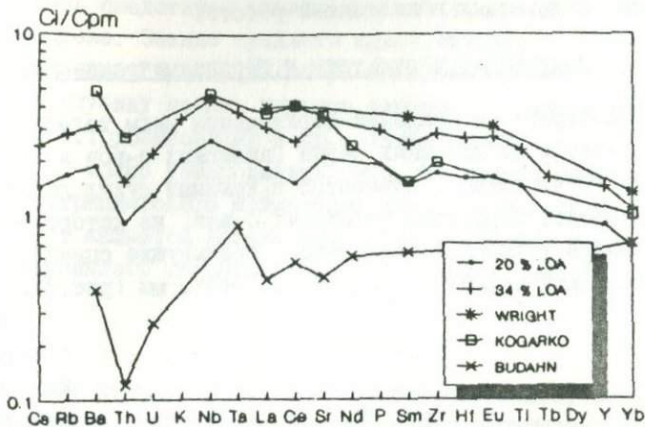


Рис.6б,в. Спайдер-диаграмма содержаний несовместимых элементов источников магм толеитовой серии Гавайских о-вов (б) и субщелочных серий Гавайских о-вов и о.Реюньон (в). Содержания нормированы к составу первичной мантии по (Sun S.S., McDonough, 1988)

к примитивному, а для ряда компонентов к обедненному мантийному веществу. В целом полученные оценки указывают на более обогащенные составы по сравнению с данными (Budahn J.R., Schmitt R.A., 1985). Это расхождение может быть следствием различных оценок степеней плавления,

грев может быть следствием адиабатической декомпрессии мантийных диапиров при подъеме. Знание среднего адиабатического градиента ультраосновного вещества (около $1^{\circ}\text{C}/\text{кбар}$) и модельной геотермы Земли позволяет оценить глубину начала подъема диапира. С учетом эффекта фазовых переходов (Л.М.Трускиновский и др., 1986) оценка составила 900 км и, таким образом, можно предположить, что источником вещества исследуемых серий внутриплитового магматизма является нижняя мантия Земли. Этот результат является независимым подтверждением концепции мантийных струй глубинного заложения при образовании данного типа магматизма.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе комплекса методов термобарогеохимии, минералогии и численного моделирования определены составы первичных расплавов толеитовой и субщелочной серий о.Гавайи и субщелочной серии о.Реюньон по петрогенным элементам и 18 элементам-примесям. Установлено, что составы первичных расплавов отвечают коматииту (18-21% вес. MgO) для толеитовой серии и пикритам-коматиитам (17-20% вес. MgO) для субщелочных серий и, в целом, характеризуются обогащением наиболее несовместимыми элементами.

2. По данным изучения магматических включений в минералах и результатам численного моделирования, определены условия ранних стадий кристаллизации толеитовой и субщелочной серий о.Гавайи и субщелочной серии о.Реюньон. Температуры кристаллизации отвечают: 1450-1180 $^{\circ}\text{C}$ для толеитовой серии о.Гавайи, 1395-1190 $^{\circ}\text{C}$ для субщелочной серии о.Гавайи и 1390-1170 $^{\circ}\text{C}$ для субщелочной серии о.Реюньон. Кристаллизация происходила при давлении 0,1-3,5 кбар в присутствии существенно углекислотного флюида. Парциальное давление H_2O во флюиде составляло 10-40 бар. Летучесть кислорода закономерно изменялась от значений близких к буферу ОФМ и на порядок ниже в области высоких температур до значений между буферами ОФМ и NiNiO в области пониженных температур.

3. На основе полученных данных, а также использования результатов петрологического эксперимента оценены P-T условия образования первичных расплавов и составы их мантийных источников. Показано, что первичные расплавы толеитовой серии Гавайских о-вов образуются на глубине около 100 км при $T = 1680-1480^{\circ}\text{C}$ в результате 20-34% частичного плавления мантийного перидотита с остатком в виде гарцбургитовой ассоциации. Первичные магмы субщелочных серий Гавайских о-вов и о.Реюнь-

они образуются в близких условиях на глубинах около 100–130 км и температурах 1650–1500°C в результате 7–34% плавления мантийного перидотита с остатком в виде гарцбургитовой или гранат–лерцолитовой ассоциации. Мантийные источники всех исследованных объектов наиболее вероятно характеризовались систематическим обогащением несовместимыми элементами относительно первичного мантийного вещества.

4. По условиям образования, составам расплавов, условиям кристаллизации и минералогическим особенностям, субщелочные магмы Гавайских о-вов и о.Реюньон практически идентичны, и, таким образом, характеризуют устойчивый тип мантийного магматизма.

5. По совокупности полученных данных сделано предположение об образовании первичных магм Гавайских о-вов и о.Реюньон в результате диапиризма мантийного вещества нижней мантии Земли.

Список опубликованных работ по теме диссертации:

1. Петрология океанитов о.Реюньон, Индийский океан, по данным изучения магматических включений в минералах. – Тезисы докладов УП Всесоюзного совещания по термобарометрии и геохимии рудообразующих флюидов. – Львов, 1985. – С. 138 (совместно с Соболевым А.В., Кононковой Н.Н.).
2. Первичный расплав и условия кристаллизации ультраосновных лав Гавайских островов. – Тезисы докладов 7 Всесоюзной школы морской геологии. – М., 1986. – С. 59 (совместно с Соболевым А.В., Кононковой Н.Н.).
3. Состав и условия кристаллизации первичного расплава толеитовой серии вулкана Килауэа, о.Гавайи (Тихий океан). – Тезисы докладов III Тихоокеанской школы по морской геологии, геофизике и геохимии. – Владивосток, 1987. – С. 132–133 (совместно с Соболевым А.В., Колесовым Н.Н., Кононковой Н.Н.).
4. Условия образования дунитовых нодулей в базальтах островов Реюньон (Индийский океан) и Гавайи (Тихий океан). – Тезисы докладов 8 Всесоюзной школы морской геологии. – М., 1988. – С. 197 (совместно с Соболевым А.В., Щербовским Е.Я.).
5. Первичные ликвидусные ассоциации главных геохимических типов магматизма Гавайских островов. – Тезисы докладов XIV семинара "Геохимия и физико-химическая петрология магматизма". – М., 1988. – С. 211 (совместно с Соболевым А.В., Кононковой Н.Н., Щербовским Е.Я.).

А.В. Соболев

1919

T-08589
Заказ 6I

Тираж 100

Ротапринт ГЕОХИ АН СССР
Подписано к печати 16.04.90
Объем 1,0 уч.-изд.л.