

УДК 551.21+553.86

ПЕТРОХИМИЯ ПОРОД ВУЛКАНА КАМЕНЬ: СРАВНЕНИЕ С СОСЕДНИМИ ВУЛКАНАМИ КЛЮЧЕВСКОЙ ГРУППЫ

© 2012 г. Т. Г. Чурикова¹, Б. Н. Гордейчик², Б. В. Иванов¹

¹Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН
683006 Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийна, 9,
e-mail: tchurikova@mail.ru

²Институт экспериментальной минералогии РАН
142432 Черноголовка, ул. Институтская, 4,
e-mail: gordei@mail.ru

Поступила в редакцию 28.06.2011 г.

В статье представлены данные по геологии, петрографии, минералогии и петрохимии пород вулкана Камень, расположенного в Центральной Камчатской депрессии. Исследование пород вулкана и их сравнение с породами соседних действующих вулканов Ключевской группы позволяют установить ряд взаимоотношений. Породы вулканов Камень и Плоские сопки систематически различаются по химическому составу пород и минералов, они не могли сформироваться из единых первичных расплавов. Породы даек и стратовулкана Камень, с одной стороны, и породы Ключевского вулкана, с другой стороны, формируют разнонаправленные тренды на петрохимических диаграммах и различаются по составам породообразующих минералов, они также не могли сформироваться из единых первичных расплавов. Лавы моногенных конусов вулкана Камень и умеренно-магнезиальные базальты Ключевского вулкана являются дериватами единых расплавов, то есть конуса, расположенные на склонах вулкана Камень, являются конусами Ключевского вулкана. Породы стратовулканов Камень и Безымянный формируют на всех петрохимических диаграммах единый узкий тренд, в котором лавы вулкана Безымянного составляют обогащенную по кремнию ветвь, что указывает на генетическую связь этих двух вулканов.

ВВЕДЕНИЕ

Среди актуальных вопросов, связанных с магнообразованием в субдукционных зонах, одним из наиболее острых является вопрос о петрохимическом и геохимическом разнообразии изверженных пород. В полной мере это относится к Ключевской группе вулканов (КГВ), расположенной в Центральной Камчатской депрессии (ЦКД) и занимающей, из-за своей активности и грандиозных масштабов, особое место среди вулканов Камчатки. Изучению продуктов извержений этого эруптивного центра посвящено большое число публикаций последних лет, в том числе [Хренов и др., 1989, 1991; Kersting, Arculus, 1995; Pineau et al., 1999; Озеров, 2000; Dorendorf et al., 2000; Миронов и др., 2001; Churikova et al., 2001, 2007; Portnyagin et al., 2007; Turner et al., 2007], причем практически во всех работах рассматриваются только действующие вулканы – Ключевской, Безымянный и Толбачик. Однако для понимания пространственно-временного развития этого вулканического узла важны и необходимы сведения и о тех вулканах, которые в настоящее время уже не являются активными, но которые работали ранее, возможно, из тех же источников, что и ныне действующие вулканы, и которые в

большинстве случаев создавали фундамент современных построек.

Одним из таких вулканов является вулкан Камень (рис. 1), расположенный в центре КГВ, между вулканами Ключевской, Безымянный и Плоские сопки (см. рис. 1а). Несмотря на близость Камня к другим активным вулканам и на грандиозные размеры его постройки (высота 4579.6 м – всего на 250 м ниже соседнего Ключевского вулкана), он до настоящего времени остается практически не изученным по сравнению со своими знаменитыми соседями. Исследования вулкана проводились лишь в 70-х годах прошлого века. В этот период В.А. Ермаковым была составлена подробная геологическая карта вулкана и были выполнены первые петрографические и петрохимические описания его пород [Ермаков, 1969, 1977]. В большей же степени интерес к вулкану Камень был вызван тем, что на его восточном склоне (см. рис. 1б) произошел один из крупнейших голоценовых обвалов [Мелекесцев, 1980; Мелекесцев, Брайцева, 1984; Ponomareva et al., 2006].

Изучение вулкана Камень представляется крайне важным, поскольку оно может пролить свет не только на историю развития самого вулкана

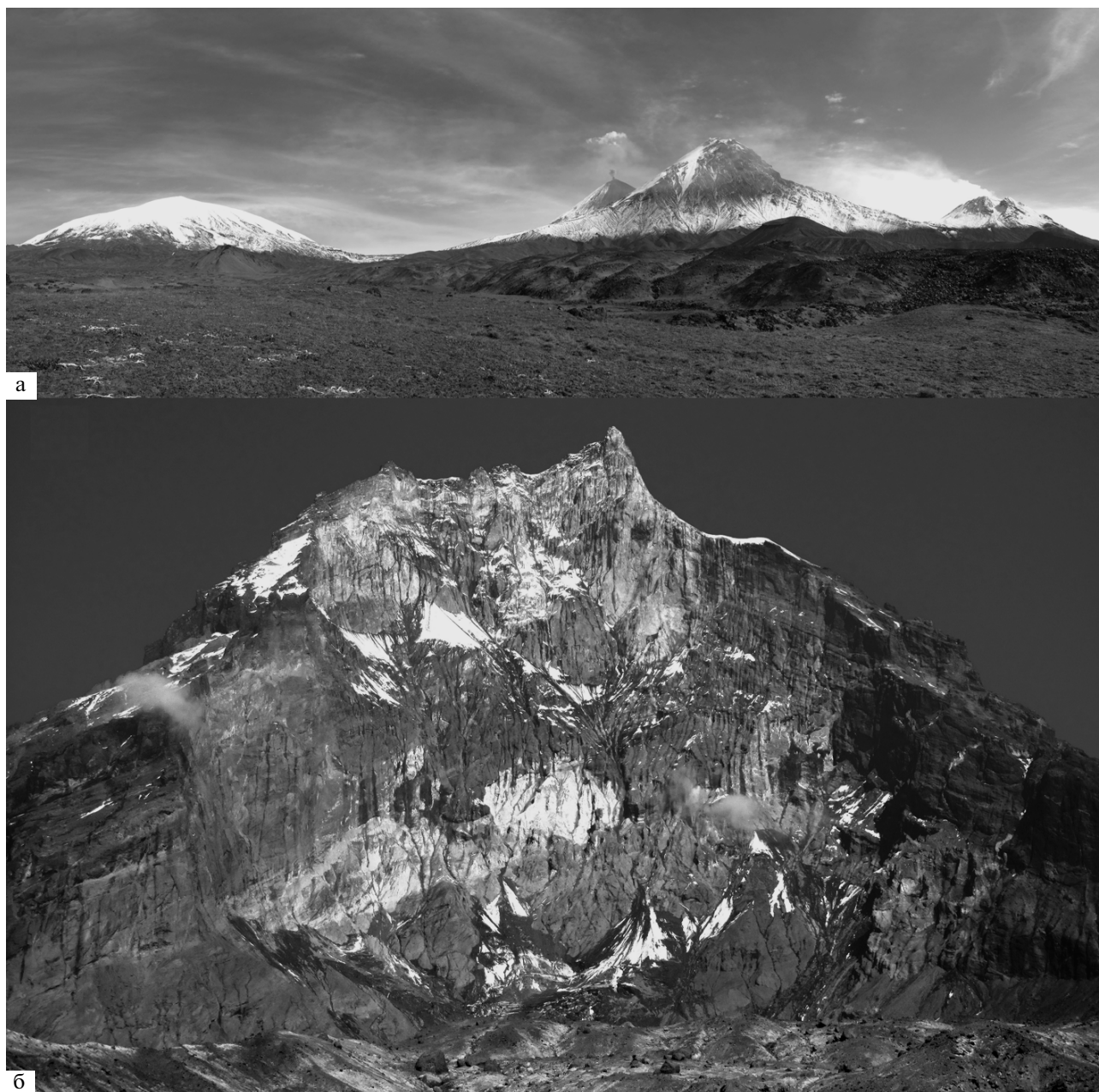


Рис. 1. Вулкан Камень.

а – общий вид четырех соседних вулканов с юго-запада, со стороны долины реки Студеной, слева направо: Плоские сопки, Ключевской, Камень, Безымянный. На Ключевском идет извержение, на Безымянном наблюдается фумарольная активность, темные холмы вблизи – ледник Богдановича. 31 августа 2010 г., фото авторов;

б – пирокластические отложения на восточной обвальной стенке вулкана Камень. Оригинальная фотография в цвете опубликована в работе [Чурикова и др., 2010], фото авторов.

на и его ближайших соседей, но и на историю формирования всего грандиозного узла КГВ. Вулкан Камень располагается на щитовом вулкане, центр которого находился под Плоскими сопками, и сам является пьедесталом двух активно действующих в настоящее время вулканов – Ключевского и Безымянного, сформировавшихся на его северном и южном склонах, соответственно.

Расстояния между вершинами Камень – Ключевская и Камень – Безымянный составляет по 5 км (см. рис. 1а). Пространственно-временная близость этих вулканов и наличие единой зоны аномального затухания сейсмических волн [Токарев, Зобин, 1970] могут указывать на их генетическое родство. Однако лавы соседних вулканов принципиально различаются: Ключевской вулкан извер-

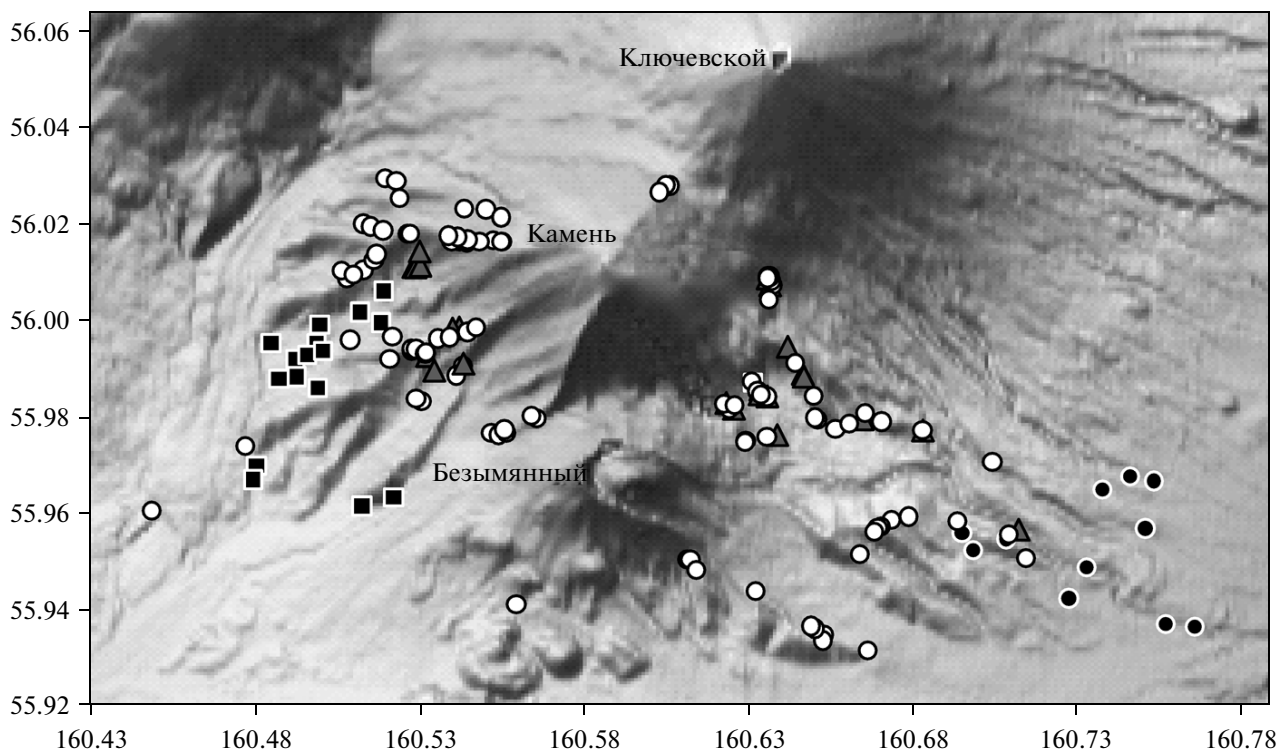


Рис. 2. Схема сбора образцов пород вулкана Камень.

Символами обозначены места сбора образцов: белые кружки – породы стратовулкана; треугольники – дайки; квадраты – лавы моногенных конусов; черные кружки – образцы пород Амбонской толщи.

гает высокомагнезиальные и высокоглиноземистые оливин-пироксен-плагиоклазовые базальты и андезитобазальты, в то время как для вулкана Безымянный характерны роговообманковые андезиты и дациты. Вулкан Плоские сопки, расположенный в 10 км к северо-западу от вулкана Камень (см. рис. 1а), представлен средне- и высококалиевыми субщелочными лавами. Любая попытка найти причины этих различий и объяснить их неизбежно вызовет вопрос: а что представляют собой породы вулкана Камень, который стоит практически посередине между этими тремя вулканами?

В ходе полевых работ 2007–2009 гг. авторами было проведено геологическое и петрологическое изучение вулкана Камень, были опробованы породы постройки стратовулкана, дайкового комплекса и моногенных конусов (рис. 2). В настоящей работе представлены данные по геологии, петрографии, минералогии и петрохимии этих пород.

1. ИСТОРИЧЕСКИЕ И ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Вулкан Камень, как и другие вулканы КГВ, сформировался на плато, образованном гигантским щитовым вулканом [Флёров, Овсянников,

1991], центр которого находился под Плоскими сопками, а его лавы обнажаются в долинах рек Студёная и Хапица, в поселках Козыревск и Ключи. Возраст этих лав определен в 270 тыс. лет [Calkins, 2004]. Постройка стратовулкана Камень формировалась в два периода, отличающихся характером извержений и типом извергаемых продуктов. Первый период характеризуется эксплозивным режимом извержения с накоплением мощного насыпного конуса, состоящего большей частью из туфов и туфобрекчий. Второй, заключительный период связан с эффузивной деятельностью и представлен лавами преимущественно малых мощностей, но протяженных по расстоянию, которые плащом покрывают ранее сформированный насыпной конус. Вероятно, с этим же периодом связано и формирование многочисленных даек, которые являлись подводными каналами лавовых излияний. Подобным же образом формировались стратовулканы Ключевской [Хренов, 2003] и Старый Шивелуч [Мелекесцев и др., 1991].

По составу пород постройка стратовулкана имеет гомодромное развитие: наиболее ранние порции лав являются существенно оливиновыми, выше по разрезу широко развиты ОI-Срх-РI породы, в которых количество темноцветных минералов уменьшается снизу вверх. Верхние части

стратовулкана характеризуются безоливиновыми породами, встречаются также отдельные потоки с роговой обманкой во вкрапленниках. Тем не менее, имеются и отклонения от этой закономерности. Так, в основании обвальной стенки вулкана на высоте 1680 м была обнаружена серия лавовых потоков, сложенных роговообманковыми андезитами.

Дайки радиальных и кольцевых структур представлены во всех секторах постройки вулкана и имеют мощности от 1 до 5 метров с протяженностью до 1.5–2 км. Большинство пород дайкового комплекса макроскопически аналогичны породам стратовулкана. Кроме того, на восточном склоне вулкана встречаются крупнокристаллические оливиновые базальты, с содержанием оливина до 20–25%, в то время как на юго-западном склоне присутствуют дайки Nb-андезитов.

Предположительно, вулкан Камень закончил свою активность в конце плейстоцена [Мелекесцев, Брайцева, 1984]. После прекращения вулканической активности геологические процессы на вулкане не остановились: с позднего плейстоцена началось разрушение постройки многочисленными обвалами [Ponomareva et al., 2006]. Это и торева-блоки – крупные части постройки, целиком съехавшие со склонов на значительные расстояния [Reiche, 1937], и разрушения меньшего масштаба. На вновь сформировавшемся после обвалов и обрушений рельефе продолжилась вулканическая активность. Около 11 тыс. ¹⁴C лет назад [Брайцева и др., 1990] на южном склоне Камня образовался вулкан Прабезымянный, постройка которого позже стала частью вулкана Безымянного, а около 7 тыс. лет назад [Мелекесцев, 1980] на северном склоне образовался вулкан Ключевской. С западной стороны Камня возникла серия шлаковых и шлако-лавовых конусов, которая, по устному сообщению В.В. Пономаревой, имеет возраст 2 ¹⁴C тыс. лет назад. В ряде случаев конуса представлены исключительно шлаковым материалом, в других случаях их лавовые потоки достигают 3–5 км. Породы конусов в основном представлены OI-Srx-Pl разностями.

Последнее из известных событий – произошедший 1200 лет назад [Мелекесцев, 1980; Мелекесцев и Брайцева, 1984; Ponomareva et al., 2006] на восточном склоне Камня крупнейший голоценовый обвал объемом до 6 км³. К настоящему времени оригинальная топография постройки сохранилась только в С-СЗ секторе вулкана, полностью покрытом ледником.

Этот крупнейший голоценовый обвал разрезал постройку почти пополам, вскрыл ее внутреннюю часть и создал уникальную возможность наблюдать разрез стратовулкана на практически вертикальной стенке высотой 2.5 км. Во время полевого сезона 2009 года авторам удалось подой-

ти к обвальной стенке достаточно близко, и несколько редких в этих местах дней с необычайно высокой прозрачностью атмосферы позволили провести детальное визуальное обследование.

Выяснилось, что около 80% стенки сложено хорошо стратифицированными пирокластическими отложениями, которые повсюду прорываются многочисленными дайками, а редкие мало-мощные лавовые потоки расположены, в основном, в верхней части постройки, т.е. приурочены к заключительной стадии развития стратовулкана. Отложения пирокластики, как правило, имеют большие мощности (десятки и сотни метров) и представлены цементированными вулканическими брекчиями, шлаками, агломератовыми туфами, лапилли и вулканическими бомбами размерами до 2 и более метров.

Представительные разрезы таких отложений (рис. 3) можно встретить в коренном залегании во многих частях постройки: в основании обвальной стенки (см. рис. 3а), на некоторых торева-блоках Северной Гривы и на двух безымянных торева-блоках, расположенных по обе стороны нижней части ледника Шмидта. Большие мощности существенно пирокластических толщ свидетельствуют о том, что значительное время вулкан работал в эксплозивном режиме.

Цвет пирокластических отложений на обвальной стенке систематически меняется от флангов взрезанной постройки к ее центру: наиболее свежие отложения темно-серого и черного цветов обнажаются на флангах (см. рис. 1б и цветную фотографию в работе [Чурикова и др., 2010]). По мере приближения к центральной части постройки эти отложения последовательно приобретают охристо-желтый цвет, затем серовато-зеленый, и, наконец, в центре они становятся красными. Изменение цвета пирокластики от флангов к центру вулкана связано, вероятно, с увеличенными тепловыми и/или гидротермальными потоками, существовавшими когда-то в центральной части, что привело к закономерным вторичным изменениям пород.

Именно такими контрастно-пестрыми отложениями пирокластики представлены и отложения обвала, произошедшего 1200 лет назад, которые называют Амбонской толщей. Породы Амбонской толщи представлены вулканическими брекчиями и туфобрекчиями с песчано-глинистым заполнителем. Цвет их составляет такой же спектр (см. цветные фотографии в работе [Чурикова и др., 2010]), что и цвет пирокластических толщ в обвальной стенке вулкана. Блоки пород Амбонской толщи могут быть представлены как чисто пирокластическим материалом, так и сложными блоками, состоящими из пирокластики и обломков лавовых потоков или даек. Именно такие блоки наиболее устойчивы к вы-

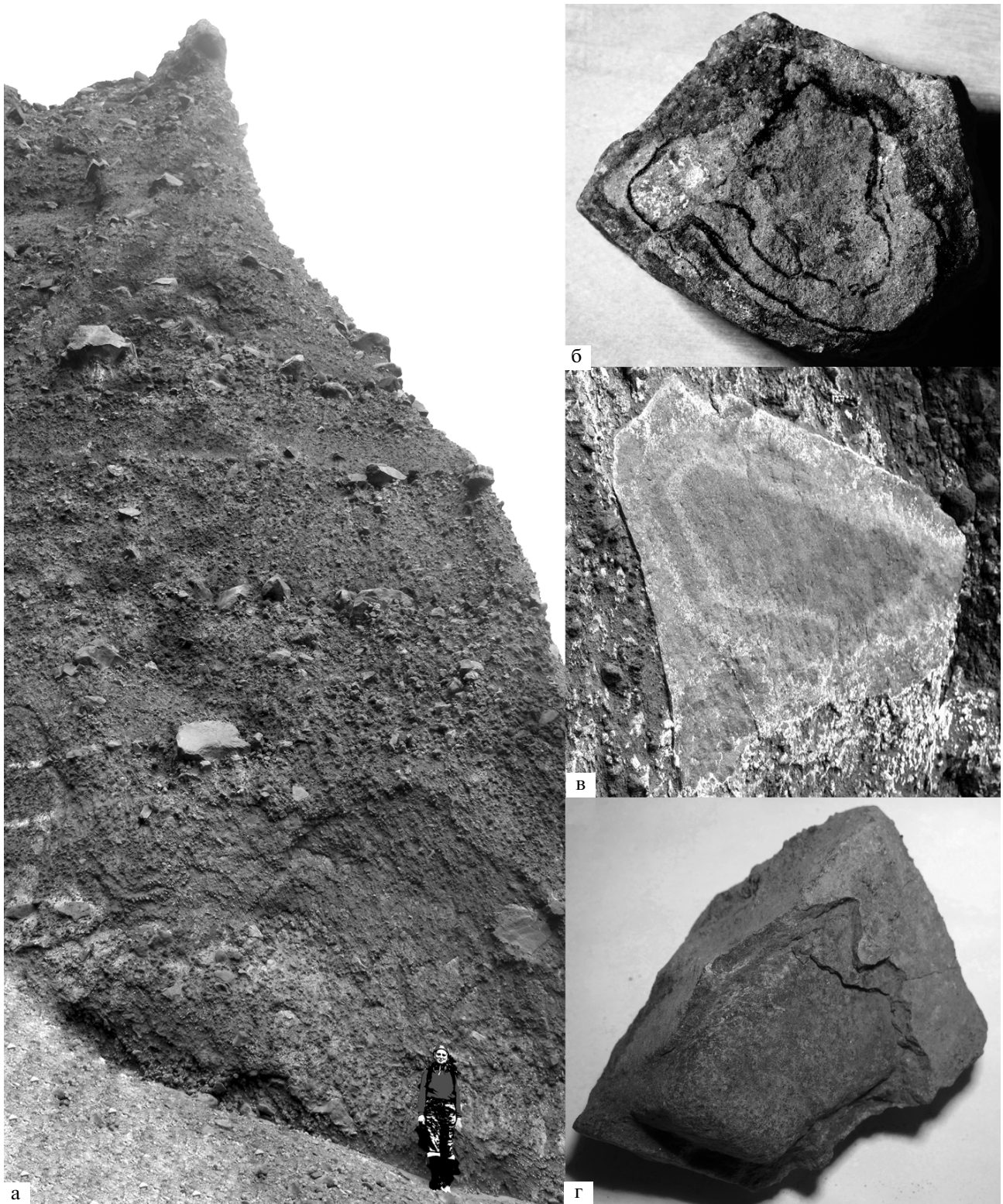


Рис. 3. Фрагменты пирокластики и Амбонской толщи вулкана Камень.
 а – пирокластические отложения на правом борту обвальной стенки; б – кольца Лизиганга в образце размером 5 см из Амбонской толщи; в – кольца Лизиганга в образце размером 50 см из пирокластических отложений на правом борту обвальной стенки; г – расслоение породы по кольцевым структурам в результате глубоких внутренних изменений, размер образца 8 см.

ветриванию и разрушению. Так известный камень Амбон с видимой мощностью 18 метров, по имени которого, собственно, и названы отложения обвала, включает в себя крупные блоки лавы, благодаря чему устойчив к разрушениям. Два торева-блока в нижней части ледника Шмидта, которые находились вблизи оси обвала, сохранились благодаря тому, что они бронируются протяженными (2.5 км) дайками оливин-пироксеновых андезит-базальтов и лавовыми потоками. В то же время на оси обвала можно наблюдать остатки полностью разрушенной пироклаستيкулы в виде конических холмов размером в первые метры, сложенных песчано-глыбовым материалом.

2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Содержание макроэлементов в породах определялось методом РФА на волнодисперсном рентгенофлуоресцентном спектрометре S4 PIONEER при помощи программы GEO-QUANT. Прибор находится в Институте Вулканологии и Сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский. Аналитические ошибки для макроэлементов составили менее 1%.

Состав породообразующих минералов стратовулкана анализировался на микрозонде JEOL JXA 8900RL, оборудованном пятью WDS детекторами, при ускоряющем напряжении 15 kV, токе зонда 15 nA, и диаметре пучка 5–10 μm . Микрозонд находится в Отделении геохимии Центра геологических наук Геттингенского университета, Германия. Измерения проводились с использованием набора синтетических и природных стандартов. Точность анализа для большинства макроэлементов была лучше, чем 5%, а для К и Р – 7%. Детальное описание методики можно найти в [Ginibre et al., 2002; Churikova et al., 2007].

Составы минералов и стекол пород моногенных конусов и даек были выполнены на микрозондовом комплексе на базе растрового электронного микроскопа “Jeol JSM-6480LV” с комбинированной системой рентгеноспектрального микроанализа, объединяющей энергодисперсионный спектрометр “INCA-Energy 350” и волновой дифракционный спектрометр “INCA-Wave 500” на четырех кристаллах. Комплекс находится в Лаборатории локальных методов исследования вещества МГУ им. М.В. Ломоносова, операторы Н.Г. Зиновьева и Н.Н. Коротаева. Образцы изучались под углеродным напылением около 30 нанометров при ускоряющем напряжении 15 kV и токе зонда 15 nA. Обработка результатов производилась при помощи профессионального лицензионного программного обеспечения: “SEM Control User Interface”, версия 7.11 (Jeol Technics LTD) и “INCA”, версия 17a (Oxford Instrument). Текущая калибровка производилась по кобальту. Погрешность измерения концентраций анализируемых

элементов энергодисперсионным методом не выходила за пределы, допустимые для данного анализа: при концентрациях 1–5 мас. % – 10 отн. %; от 5 до 10 мас. % – до 5 отн. %; свыше 10 мас. % – до 2 отн. %.

3. ПЕТРОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОРОД

Макроскопически породы вулкана Камень представлены лавами с разной пористостью и различным обогащением фенокристаллами. Структуры пород меняются от субафировых и серийно-порфировых до крупно- и мегапорфировых. При этом мегаплагиофировых пород, аналогичных лавам плато под Ключевской группой вулканов, и встречающихся на некоторых вулканах ЦКД, обнаружено не было. Основными минералами-вкрапленниками пород стратовулкана являются оливин, клино- и ортопироксен, плагиоклаз, ильменит, магнетит, редко – роговая обманка.

По петрографическим и минералогическим особенностям все породы вулкана Камень можно разделить на 7 типов, образующих четыре группы. Это группы оливин-содержащих (Ol-2Px и Ol-Srx), безоливиновых (2Px-Pl, Srx-Pl и собственно Pl), субафировых и роговообманково-содержащих разновидностей. В постройке стратовулкана наблюдаются все перечисленные типы пород. Лавы моногенных конусов представлены оливин-содержащими и субафировыми разновидностями, а породы дайкового комплекса – оливин-содержащими и, в одном случае, роговообманково-содержащими вулканитами. Оливин-содержащие породы наблюдаются во всех вулканических комплексах. Безоливиновые породы встречаются только в постройке стратовулкана. Субафировые породы имеются в постройке стратовулкана, в потоках и бомбах моногенных конусов. Роговообманково-содержащие породы очень редки. Породы, слагающие Амбонскую толщу и проявленные на восточной обвальной стенке вулкана заслуживают отдельного описания.

3.1. Оливин-содержащие породы

3.1.1. Оливин-клинопироксеновые породы наиболее распространены на вулкане Камень. Они присутствуют на всех этапах активности: слагают большую часть постройки стратовулкана, присутствуют среди пород дайкового комплекса и слагают большинство пород моногенных конусов. Структуры пород, как правило, порфировые и серийно-порфировые. Количество темноцветных минералов 5–20%. Соотношения оливина и клинопироксена значительно меняются; довольно часто среди минералов-вкрапленников присутствует плагиоклаз. Зерна оливина и клинопироксена имеют хорошую огранку, часто зональны.

Нередко вокруг зерен оливина наблюдается кайма, выполненная мелкозернистым агрегатом клинопироксена. Часто в оливинах этой группы пород, как и в оливинах оливин-двупироксеновых разностей, встречаются сильно раскристаллизованные расплавные включения. Основная масса заметно различается не только по цвету — от светлой до почти черной, но и по структуре: в некоторых породах основная масса сильно раскристаллизована, в других — содержит большое количество чистого бурого стекла. Фенокристаллы плагиоклаза, периодически встречающиеся в этих породах, часто сильно резорбированы по зонам роста или по всей внутренней части; имеют футлярвидную структуру, часто формируют двойники.

При этом в породах моногенных конусов, как правило, оливин преобладает над клинопироксеном, в то время как в породах постройки стратовулкана и дайкового комплекса преобладает клинопироксен, а оливин в них закономерно мельче и имеет подчиненное значение. В породах моногенных конусов оливин часто формирует крупные кристаллы, размером до 1 см, в то время, как для пород постройки и дайкового комплекса характерны крупные кристаллы клинопироксена и/или его сростки.

3.1.2. Оливин-двупироксеновые породы встречаются реже на вулкане. Их можно обнаружить как в теле стратовулкана, так и среди пород дайкового комплекса, реже в лавах моногенных конусов. В постройке стратовулкана они слагают более низкие части. Структуры пород, как правило, серийно-порфировые, средне и крупно зернистые, текстуры порфировые. Породы характеризуются большим количеством темноцветных минералов, количество которое меняется от 10% до 25%; максимальные количества темноцветных минералов обнаружены в дайках, расположенных на двух торевых блоках на восточной стороне вулкана. Соотношения оливина и пироксенов значительно варьируют, от существенно оливиновых до существенно пироксеновых разностей. В первых оливин образует крупные, хорошо ограненные кристаллы, с большим количеством природно-закаленных и раскристаллизованных расплавных включений и многочисленными вростками шпинели. В существенно пироксеновых лавах ортопироксен представлен более крупными, чем оливин субфенокристаллами, а клинопироксен часто формирует крупные сростания. Клино- и ортопироксен нередко образуют крупные гломеропорфировые сростки размером до 10–15 мм. Иногда зерна клинопироксена зональны и частично резорбированы по зонам роста. Основная масса в разной степени окислена и раскристаллизована. При этом породы даек раскристаллизованы сильнее, чем породы лавовых потоков. Плагиоклаз присутствует главным образом в основной массе,

редкие отдельные зерна отмечаются и среди вкрапленников некоторых пород.

3.2. Безоливиновые породы

3.2.1. Двупироксен-плагиоклазовые породы были встречены в нескольких образцах только в северо-западном секторе постройки стратовулкана. Породы характеризуются преобладанием плагиоклаза, тем не менее, зерна ортопироксена достигают крупных размеров и составляют до 30% породы. Пироксен зонален, образует гломеропорфировые сростки. Эти породы обладают высокой прочностью при раскалывании и формируют бронирующие потоки разрезков.

3.2.2. Клинопироксен-плагиоклазовые породы встречаются только среди пород стратовулкана. Их можно обнаружить в разных секторах вулкана, но петрографически они очень схожи. Структура пород преимущественно порфировая. Содержание темноцветных минералов 5–8%. Кроме клинопироксена и плагиоклаза крайне редко отмечаются мелкие субфенокристаллы оливина. Клинопироксен образует крупные, часто зональные фенокристаллы таблитчатой формы, иногда достигающие размера 8–10 мм. Плагиоклаз формирует удлиненные призмы, кристаллы по размеру мельче — 2–3 мм, но по количеству они преобладают. Кристаллы плагиоклаза также часто зональны и нередко резорбированы.

3.2.3. Существенно плагиоклазовые породы, как и два предыдущих типа пород, развиты только в теле постройки стратовулкана и не отмечены в других комплексах пород. Кроме фенокристаллов плагиоклаза, в этих породах отмечены темноцветные минералы — оливин или клинопироксен, но общее содержание их в породах не превышает 1%. При этом темноцветные минералы всегда мелкие — не более 1–3 мм. Различные по размерам зерна плагиоклаза формируют серийно-порфировую структуру породы.

3.3. Субафировые породы

Субафировые породы встречаются в стратовулкане, бомбах и лавовых потоках моногенных конусов. Для них характерны мелкозернистые структуры, разная степень раскристаллизованности основной массы и полное или почти полное отсутствие минералов-вкрапленников. В основной массе могут присутствовать микролиты оливина, пироксенов и плагиоклаза в разных пропорциях. Субафировые породы верхних слоев стратовулкана не содержат оливина и в микролитах. Все минералы, как правило, имеют хорошую огранку. Стекло основной массы в нераскристаллизованных участках меняется от практически

белого до бурого, что, вероятно, связано с разной степенью окисления породы.

3.4. Роговообманково-содержащие породы

Роговообманково-содержащие породы в коренном залегании встречаются в единичных случаях: компактная серия небольших сильно разрушенных даек в юго-западном секторе вулкана, один лавовый поток в основании восточной обвальнoй стенки и лавовый поток на высоте около 3000 м на северо-западном склоне. Кроме того, на левом борту Амбонской толщи встречаются крупные блоки светлых дацитовых пород с роговой обманкой. В коренном залегании эти породы обнаружить не удалось.

Вся роговая обманка в породах вулкана имеет мощную опацит-магнетитовую кайму, во многих случаях присутствие роговой обманки определяется по сохранившейся форме кристалла, а весь минерал замещен вторичными образованиями. В породах разрушенного потока на северо-западном склоне присутствуют вкрапленники темноцветных минералов — оливин и клинопироксен. По содержанию и размеру зерен роговой обманки породы значительно варьируют. В некоторых породах размер кристаллов роговой обманки достигает 2–3 см, а ее количество — 5–7%, в других же случаях могут быть отдельные мелкие зерна.

Есть еще два объекта, где встречена роговая обманка: это тую Кулич в юго-западном секторе вулкана и экструзия Крошка на Северной Гриве. Оба этих образования сложены Pl-Hb-андезитами, которые макроскопически и петрографически схожи с породами соседнего вулкана Безымянный. Роговая обманка составляет около 10% в тую Кулич и до 30% в экструзии Крошка. В тую роговая обманка почти полностью опацититизирована, в породе экструзии она изменена значительно меньше. Вкрапленники плагиоклаза имеют размер 4–5 мм. В породе экструзии также отмечается около 30% кварца, который достигает размера 1 см.

3.5. Породы Амбонской толщи и обвальнoй стенки

Отдельно следует сделать несколько замечаний о породах, слагающих Амбонскую толщу и о пирокластических отложениях в обвальнoй стенке. По сути, это одни и те же породы, слагавшие ранее внутренние части вулкана. Петрографически блоки из пирокластических отложений и Амбонской толщи идентичны и представлены тремя разновидностями: оливин-клинопироксеновыми, оливин-двупироксеновыми и клинопироксен-плагиоклазовыми породами.

Обращает на себя внимание тот факт, что все в той или иной степени окрашенные отложения Амбонской толщи и пирокластики в разной степени

изменены. Судя по характеру этих изменений, породы претерпели сильные температурные и/или гидротермальные изменения. Эти изменения усиливаются от флангов вулкана к центру, или от краев обвала к его оси. На оси обвала разные обломки в одной брекчии могут быть совершенно разного цвета, представляя собой контрастно-пеструю породу (см. цветные фотографии в работе [Чурикова и др., 2010]). При этом изменения очевидны не только на мелких обломках (см. рис. 3б), но также и на крупных блоках лав (см. рис. 3в). Часто встречаются обломки различного масштаба с кольцами Лизиганга (см. рис. 3б, 3в, 3г), что свидетельствует, скорее о гидротермальной, нежели о температурной, проработке пород. Зачастую по этим кольцам порода разрушается и принимает в результате вид яйца с ясно определяемыми и отделяемыми оболочками (см. рис. 3г). Ввиду того, что фрагменты лав Амбонской толщи, а также фрагменты лав из пирокластики в центральных частях вулкана в значительной степени изменены, они не могут быть использованы для петролого-геохимических исследований.

По мере отдаления от центральных частей вулкана, лавовые фрагменты пирокластических отложений становятся менее измененными. Хотя макроскопически образцы во многих случаях выглядят свежими, исследование под микроскопом показывает, что породы сильно окислены. Окисление в этих образцах затрагивает не только основную массу, но и каймы темноцветных пороодообразующих минералов, поэтому далеко не всегда можно найти неизменные ядра кристаллов-вкрапленников. Только образцы, взятые из пирокластической толщи на крайних флангах вулкана, являются свежими, не обнаруживают следов вторичных изменений и могут использоваться для дальнейшего геохимического изучения.

4. МИНЕРАЛОГИЯ ПОРОД

Для микронзондового анализа минеральных фаз (рис. 4) было выбрано 5 представительных образцов: 2 образца постройки стратовулкана, 2 образца моногенных шлако-лавовых конусов и 1 образец оливин-клинопироксеновой дайки. Всего было проанализировано 200 фенокристаллов оливинов, 145 вкрапленников клинопироксенов, 49 зерен плагиоклазов, представительные анализы приведены в табл. 1. При построении диаграмм мы также использовали ранее опубликованные данные [Альмеев, 2005; Иванов, 2008].

4.1. Минералогия пород стратовулкана

Составы оливинов постройки стратовулкана Камень варьируют от Fo₆₀ до Fo₈₃, имея одномодальное распределение с максимумом в Fo₇₇₋₇₉

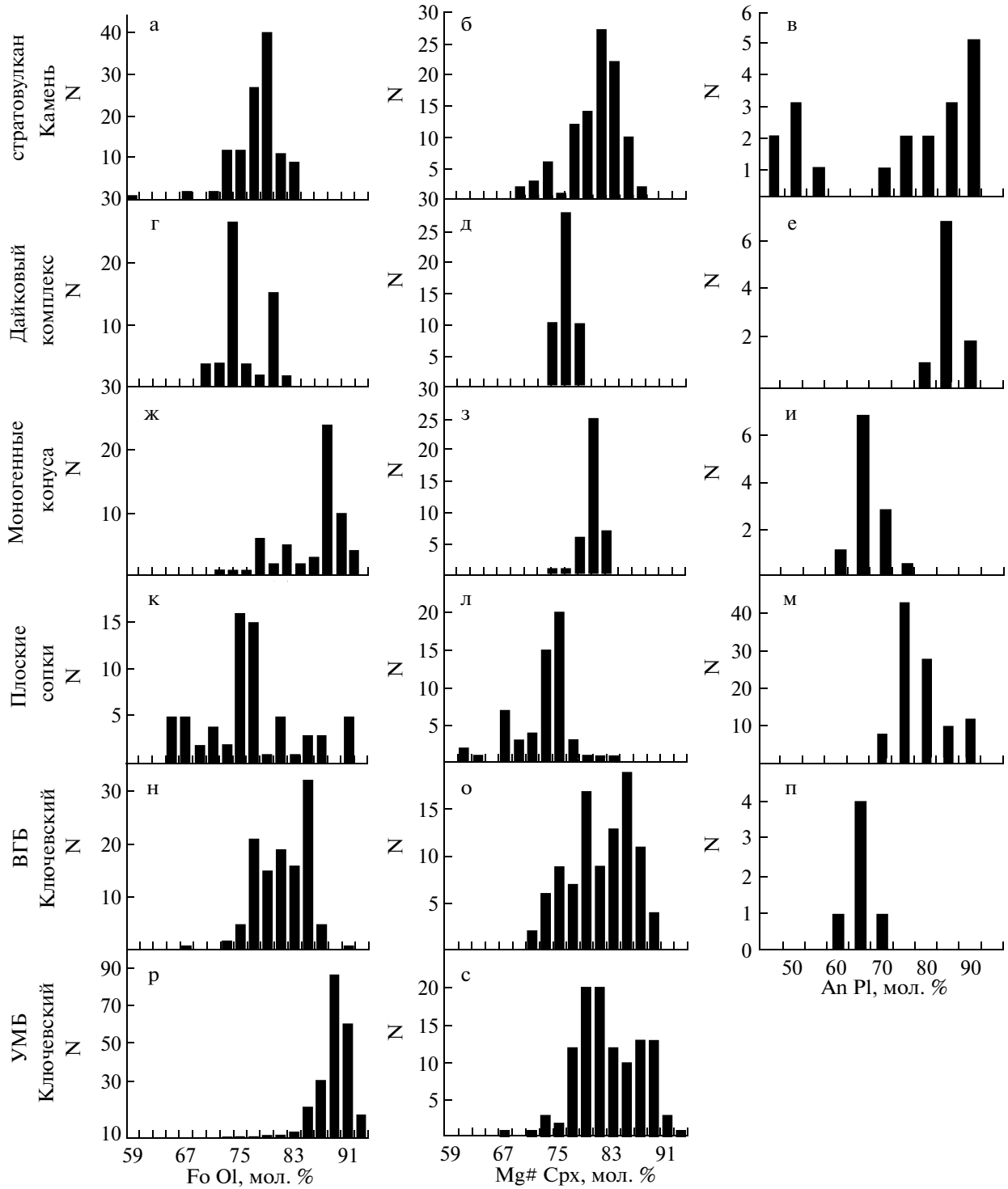


Рис. 4. Составы минералов пород различных комплексов вулкана Камень и базальтов соседних вулканов.

Для пород вулкана Камень: а–в – стратовулкан, г–е – дайки, ж–и – моногенные конуса. Породы вулкана Плоские сопки – к–м. Для пород Ключевского вулкана: н–п – высоко-глиноземистые базальты (ВГБ), р–с – умеренно-магнезиальные базальты (УМБ).

Графики а, г, ж, к, н, р показывают распределение оливинов в зависимости от их состава; б, д, з, л, о – распределение клинопироксенов в зависимости от их магнезиального номера; в, е, и, м, п – распределение плагиоклазов в зависимости от их анортитовой составляющей.

Fo Ol – состав оливина; $Mg\# Cpx = 100 * Mg / (Mg + Fe)$ – магнезиальность клинопироксена; An Pl – состав плагиоклаза.

Таблица 1. Представительные анализы минералов в породах вулкана Камень

Оливины											
	Образец	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	MnO	CaO	NiO	Cr ₂ O ₃	Total
Стратовулкан	2310	37.51	0.01	0.01	29.75	33.19	0.54	0.20	0.04	0.02	101.27
—	2310	38.22	0.05	0.03	24.99	37.47	0.42	0.15	0.04	0.00	101.37
—	2310	38.50	0.03	0.01	22.81	39.22	0.39	0.13	0.03	0.03	101.15
—	2310	39.29	0.02	0.01	19.86	41.66	0.29	0.12	0.08	0.05	101.38
—	2310	39.73	0.01	0.05	16.43	44.17	0.25	0.15	0.10	0.03	100.91
—	КАМ-08-07	37.96	0.00	0.00	27.61	34.51	0.29	0.19	0.00	0.00	100.55
—	КАМ-08-07	37.28	0.00	0.00	24.69	36.53	0.44	0.17	0.00	0.00	99.12
—	КАМ-08-07	37.66	0.00	0.20	22.67	37.71	0.25	0.21	0.00	0.00	98.70
—	КАМ-08-07	38.14	0.00	0.00	20.73	39.64	0.25	0.20	0.48	0.00	99.44
—	КАМ-08-07	38.53	0.00	0.00	19.75	39.62	0.40	0.00	0.00	0.00	98.30
Дайка	КАМ-08-А1	37.14	0.00	0.00	28.61	32.65	0.49	0.00	0.00	0.00	98.88
—	КАМ-08-А1	39.06	0.00	0.00	19.48	41.20	0.28	0.00	0.00	0.00	100.02
—	КАМ-08-А1	38.56	0.00	0.00	19.99	40.36	0.24	0.22	0.00	0.00	99.36
—	КАМ-08-А1	37.89	0.00	0.00	25.84	35.71	0.52	0.00	0.00	0.00	99.97
—	КАМ-08-А1	38.45	0.00	0.00	20.75	39.80	0.00	0.14	0.00	0.00	99.14
Конуса	КАМ-08-01	38.71	0.00	0.00	20.03	40.85	0.00	0.24	0.00	0.00	99.83
—	КАМ-08-01	37.01	0.00	0.00	26.07	34.70	0.36	0.24	0.00	0.00	98.38
—	КАМ-08-01	39.53	0.00	0.00	17.34	43.72	0.00	0.31	0.36	0.00	101.25
—	КАМ-08-01	41.12	0.00	0.00	9.46	49.69	0.00	0.15	0.47	0.00	100.89
—	КАМ-08-01	40.57	0.00	0.00	12.04	47.38	0.36	0.00	0.00	0.00	100.35
—	КАМ-08-67/1	40.61	0.00	0.00	11.67	47.49	0.00	0.18	0.46	0.00	100.42
—	КАМ-08-67/1	38.09	0.00	0.00	21.19	39.50	0.29	0.21	0.00	0.00	99.29
—	КАМ-08-67/1	40.89	0.00	0.00	9.47	49.69	0.00	0.29	0.00	0.00	100.33
—	КАМ-08-67/1	40.26	0.00	0.00	13.15	45.93	0.00	0.19	0.40	0.00	99.93
—	КАМ-08-67/1	39.61	0.00	0.00	15.62	43.94	0.27	0.16	0.00	0.00	99.59

Клинопироксены													
	Образец	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	MnO	CaO	NiO	Cr ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Total
Стратовулкан	2310	51.03	0.74	2.70	11.43	15.11	0.37	17.73	0.00	0.01	0.40	0.00	99.5
—	2310	49.71	0.91	4.52	8.69	14.97	0.24	20.44	0.02	0.03	0.34	0.02	99.9
—	2310	50.62	0.54	4.80	6.88	15.35	0.17	21.04	0.01	0.25	0.39	0.02	100.1
—	2310	51.33	0.55	3.47	6.00	16.14	0.14	21.89	0.04	0.45	0.21	0.03	100.2
—	2310	52.26	0.30	2.78	5.19	16.94	0.15	21.15	0.02	0.70	0.33	0.00	99.8
—	2310, Орх	53.01	0.41	1.35	19.97	20.76	0.66	4.13	0.00	0.04	0.25	0.02	100.6
—	КАМ-08-07	49.07	0.72	5.13	9.56	12.78	0.32	21.10	н.о.	0.00	0.47	0.00	99.2
—	КАМ-08-07	49.09	0.71	5.75	8.90	14.43	0.35	19.05	н.о.	0.00	0.94	0.00	99.2
—	КАМ-08-07	50.57	0.72	4.12	7.74	15.06	0.00	21.57	н.о.	0.27	0.29	0.00	100.3
—	КАМ-08-07	49.28	0.55	5.15	6.98	15.21	0.00	20.02	н.о.	0.47	0.60	0.00	98.3
—	КАМ-08-07	51.26	0.31	3.57	6.23	16.23	0.00	21.11	н.о.	0.28	0.45	0.00	99.4
Дайка	КАМ-08-А1	48.33	0.90	6.61	9.36	13.58	0.28	20.08	н.о.	0.00	0.47	0.00	99.6
—	КАМ-08-А1	50.00	0.81	5.27	9.53	15.10	0.00	19.11	н.о.	0.00	0.61	0.00	100.4
—	КАМ-08-А1	50.68	0.58	3.18	9.14	15.39	0.35	20.24	н.о.	0.00	0.45	0.00	100.0
—	КАМ-08-А1	50.78	0.53	4.49	8.34	15.49	0.00	20.13	н.о.	0.00	0.39	0.00	100.1
—	КАМ-08-А1	49.20	0.83	5.61	7.66	14.74	0.00	21.08	н.о.	0.00	0.42	0.00	99.5
Конуса	КАМ-08-67/1	51.91	0.61	2.90	9.07	17.16	0.00	17.86	н.о.	0.39	0.28	0.00	100.2
—	КАМ-08-67/1	52.89	0.46	2.13	8.57	18.05	0.46	17.65	н.о.	0.27	0.31	0.00	100.8
—	КАМ-08-67/1	51.94	0.29	2.20	8.36	18.17	0.24	16.97	н.о.	0.43	0.49	0.00	99.1
—	КАМ-08-67/1	52.66	0.33	2.28	8.05	17.98	0.39	17.56	н.о.	0.67	0.36	0.00	100.3
—	КАМ-08-67/1	52.84	0.00	2.03	7.64	17.66	0.37	18.40	н.о.	0.47	0.25	0.00	99.7
—	КАМ-08-01	51.73	0.59	2.88	9.78	16.90	0.28	17.72	н.о.	0.00	0.41	0.00	100.3
—	КАМ-08-01	52.83	0.53	2.10	9.26	18.34	0.32	16.86	н.о.	0.36	0.38	0.00	101.0
—	КАМ-08-01	52.28	0.68	2.56	8.61	17.56	0.30	17.77	н.о.	0.41	0.38	0.00	100.6
—	КАМ-08-01	52.85	0.44	2.10	8.26	17.84	0.29	18.38	н.о.	0.32	0.36	0.00	100.9
—	КАМ-08-01	52.38	0.51	2.53	7.70	17.70	0.00	18.13	н.о.	0.62	0.28	0.00	99.8

Таблица 1. Окончание

Плаггиоклазы									
	Образец	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total
Стратовулкан	2310	56.38	26.18	0.84	0.09	9.31	6.09	0.43	99.5
—	2310	54.81	27.55	0.33	0.03	10.41	5.55	0.24	99.0
—	2310	50.00	30.68	0.82	0.10	14.53	3.26	0.21	99.8
—	2310	47.01	32.51	0.73	0.06	16.65	2.04	0.08	99.1
—	2310	45.37	33.50	0.72	0.05	17.84	1.28	0.05	98.8
—	КАМ-08-07	47.67	31.80	0.85	н.о.	15.99	2.27	0.15	98.7
—	КАМ-08-07	45.63	32.80	0.57	н.о.	16.80	2.02	0.15	98.0
—	КАМ-08-07	45.50	32.78	0.65	н.о.	17.11	1.78	0.00	97.8
—	КАМ-08-07	46.11	33.46	0.42	н.о.	17.34	1.58	0.00	98.9
—	КАМ-08-07	44.62	33.62	0.72	н.о.	18.05	1.28	0.00	98.3
Дайка	КАМ-08-А1	46.96	32.27	0.77	н.о.	16.06	2.38	0.00	98.4
—	КАМ-08-А1	47.31	33.10	0.52	н.о.	16.96	2.21	0.00	100.1
—	КАМ-08-А1	47.49	33.29	0.57	н.о.	16.87	1.99	0.00	100.2
—	КАМ-08-А1	46.61	33.11	0.72	н.о.	17.32	1.78	0.00	99.5
—	КАМ-08-А1	46.23	34.12	0.61	н.о.	17.75	1.46	0.00	100.2
Конуса	КАМ-08-01	53.97	28.72	0.80	0.00	12.08	4.66	0.32	100.5
—	КАМ-08-01	53.09	29.26	0.77	0.00	12.54	4.56	0.35	100.6
—	КАМ-08-01	53.59	29.29	0.77	0.23	12.74	4.30	0.25	101.2
—	КАМ-08-01	52.46	30.11	0.52	0.36	13.54	3.91	0.21	101.1
—	КАМ-08-01	50.97	31.37	0.60	0.00	14.67	3.44	0.31	101.4
—	КАМ-08-67/1	53.44	28.47	0.89	0.23	11.57	4.33	0.29	99.2
—	КАМ-08-67/1	52.82	29.16	0.71	0.22	12.74	4.23	0.22	100.1
—	КАМ-08-67/1	52.42	29.26	0.55	0.23	12.76	4.11	0.24	99.6
—	КАМ-08-67/1	52.20	29.27	0.60	0.21	13.00	4.00	0.14	99.4
—	КАМ-08-67/1	51.23	29.76	0.56	0.18	13.39	3.75	0.24	99.1

Рудные минералы											
	Образец	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	MnO	CaO	NiO	Cr ₂ O ₃	Total
Стратовулкан	2310	0.10	11.37	9.75	67.70	4.33	0.39	0.03	0.05	1.66	95.38
—	2310	0.33	7.13	9.61	74.50	2.52	0.50	0.47	0.01	1.08	96.21
—	2310	0.36	18.55	1.24	72.37	2.16	0.50	0.37	0.00	0.08	95.63
—	2310	0.28	2.69	18.54	67.42	8.85	0.50	0.35	0.00	0.29	98.93
—	2310	0.20	1.40	49.34	31.69	12.68	0.21	0.03	0.10	2.61	98.25

(см. рис. 4а). Содержания микроэлементов в оливинах значительно варьируют: содержания NiO меняются от 0.009% до 0.48%, Cr₂O₃ — от 0.007% до 0.06% и CaO от 0.1% до 0.278%. При этом NiO/Cr₂O₃ и NiO/CaO отношения довольно низкие и в среднем составляют 3.5 и 0.38, соответственно (рис. 5а). Из-за низких значений магнезиального номера оливина и низкого содержания никеля в оливине, оливины вулкана Камень не попадают в мантийную стрелку, предложенную в работе [Ozawa, 1984], следовательно, базальты

вулкана Камень претерпели значительное фракционирование.

Клинопироксены вулкана Камень в основном соответствуют по составу авгиту с магнезиальным номером Mg# (Mg# = 100*Mg/(Mg + Fe)), варьирующим в том же диапазоне, что и магнезиальный номер оливина, и также имеющим одномодальное распределение с максимумом в Mg#79 (см. рис. 4б). Содержания микроэлементов в клинопироксенах варьируют в следующих диапазонах: содержания Cr₂O₃ меняются от 0.01% до

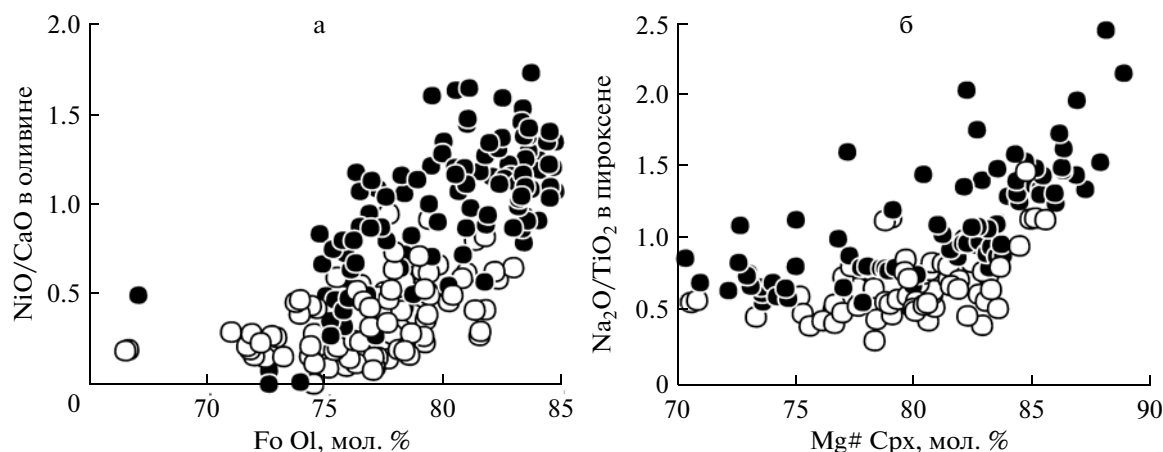


Рис. 5. Отношения микроэлементов в оливинах и пироксенах из базальтов стратовулкана Камень и из высокоглиноземистых базальтов Ключевского вулкана.

а – диаграмма зависимости отношения NiO/CaO в оливинах от магнезиального номера оливина; б – диаграмма зависимости отношения Na₂O/TiO₂ в пироксенах от магнезиального номера пироксена. Символами обозначены: белые кружки – минералы вулкана Камень, черные кружки – минералы ВГБ Ключевского вулкана.

Fo Ol – состав оливина; Mg# Cpx = 100*Mg/(Mg + Fe) – магнезиальность клинопироксена.

0.76%, MnO – от 0.09% до 0.60%, Na₂O – от 0.02% до 0.50% и TiO₂ от 0.25% до 1.07%. При этом содержания Cr₂O₃ закономерно падают, а содержания TiO₂ растут с понижением Mg# клинопироксена, значения же MnO и Na₂O практически не меняются (см. рис. 5б).

Плагиоклазы в породах постройки стратовулкана характеризуются высокими значениями анортитовой составляющей с максимумами при An₈₇₋₉₃. Некоторые образцы при этом обнаруживают двумодальное распределение с максимальными значениями при An₅₀ и An₉₀ (см. рис. 4в). Вероятно, двумодальное распределение отмечает два этапа кристаллизации этого минерала в ходе эволюции расплава. Надо отметить низкую магнезиальность и высокую железистость всех плагиоклазов.

В исследованных породах постройки вулкана не было обнаружено высоко-Cr шпинелей, рудный минерал представлен высоко-Al шпинелью, магнетитом и титаномагнетитом. Al₂O₃ коррелирует положительно с MgO, а TiO₂ с FeO в рудной фазе.

Близкое распределение Fo в оливине и Mg# в клинопироксене свидетельствует о том, что эти минералы находятся в равновесии в исследованных породах. Низкие значения Mg# оливина и клинопироксена и низкие концентрации в них Ni и Cr свидетельствуют о значительном фракционировании расплава, из которого кристаллизовались минералы. Такой вывод подтверждается и отсутствием высоко-Cr шпинели в оливинах.

4.2. Минералогия пород дайкового комплекса

В породах дайкового комплекса составы оливинов варьируют от Fo₆₆ до Fo₈₀, что находится в тех же пределах, что и в породах стратовулкана Камень. Распределение оливинов в исследуемом образце КАМ-08-A1 двумодальное, с максимумами в Fo₇₀ и Fo₇₈ (см. рис. 4г). Такое поведение, вероятно, свидетельствует о двух уровнях генерации этого минерала – один как минерал-вкрапленник, формирующийся при фракционной кристаллизации расплава, второй – как субфенокристалл, образованный в результате остывания основной массы. Содержание CaO в оливинах варьируют от 0.15% до 0.27%.

Клинопироксены дайкового комплекса в основном соответствуют по составу авгиту. Их магнезиальный номер Mg# изменяется от 74 до 78 и находится в том же диапазоне, что и магнезиальный номер оливинов, что может свидетельствовать о равновесных условиях кристаллизации этих двух минералов. Распределение Mg# пироксенов одномодальное с максимумом в Mg#76 (см. рис. 4д). Для содержаний микроэлементов в клинопироксенах характерны следующие диапазоны: MnO – от 0.28% до 0.45%, Na₂O – от 0.27% до 0.61% и TiO₂ – от 0.36% до 1.00%. При этом, как и в пироксенах из пород постройки стратовулкана, содержания TiO₂ растут с понижением Mg# клинопироксена, значения же MnO и Na₂O практически не меняются.

Плагиоклазы даек варьируют от An₇₈ до An₈₈ и обнаруживают одномодальное распределение с максимумом в An₈₄₋₈₆ (см. рис. 4е). Эти плагиоклазы содержат несколько больше натрия, чем плагиоклазы пород стратовулкана.

В целом составы минералов пород стратовулкана и пород даек довольно близки и могли кристаллизироваться из единых расплавов при близких *P-T* условиях.

4.3. Минералогия пород моногенных конусов

Составы минералов пород моногенных конусов систематически отличаются от минералов даек и стратовулкана. В двух исследованных образцах конусов оливины имеют состав от Fo₇₀ до Fo₉₂ с одномодальным распределением в максимуме Fo₈₈ (см. рис. 4ж). Присутствие в породах большого количества высоко-Mg оливина свидетельствует о том, что начало кристаллизации происходило из высоко-Mg расплава. Аналогичные оливины были неоднократно описаны в породах Ключевского вулкана в т.ч. [Мионов, 2009]. По содержанию микроэлементов в оливинах два исследованных образца моногенных конусов также близки: содержания NiO меняются от 0.35% до 0.6% и CaO от 0.15% до 0.35%.

Клинопироксены пород моногенных конусов имеют магнезиальный номер Mg# заметно ниже, чем Mg# оливинов, он варьирует в пределах от 72 до 80, имея одномодальное распределение с максимумом в Mg#79 (см. рис. 4з). Этот факт свидетельствует о том, что клинопироксен кристаллизовался значительно позже и с перерывом относительно оливина из уже значительно фракционированного расплава. Содержания микроэлементов в клинопироксенах конусов значительно варьируют: MnO — от 0.24% до 0.46%, Na₂O — от 0.21 % до 1.08% и TiO₂ от 0.27% до 0.75%.

Плагиоклазы в породах моногенных конусов имеют более натриевый состав, чем плагиоклазы в породах дайкового комплекса, и варьируют от An₅₅ до An₇₅, имея одномодальное распределение с максимумом An₆₅ (см. рис. 4и). Это свидетельствует о поздней кристаллизации плагиоклаза в породах моногенных конусов. Заметим, что поздняя кристаллизация плагиоклаза наблюдалась и в породах Ключевского вулкана [Мионов, 2009].

5. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАКРОЭЛЕМЕНТОВ В ПОРОДАХ

Все три комплекса пород вулкана Камень — постройка стратовулкана, моногенные конуса и дайки — принадлежат к умеренно-К субщелочным базальт-андезибазальтовым сериям (рис. 6). Но при этом на диаграмме Харкера наблюдаются значительные закономерные различия между этими тремя комплексами. Породы постройки стратовулкана являются высокоглиноземистыми низкомагнезиальными (MgO < 6%) разностями базальт-андезибазальтового ряда и формируют устойчивые тренды на большинстве диаграмм с

повышением K₂O (см. рис. 6а) и понижением TiO₂, Al₂O₃, CaO, FeO и MgO (см. рис. 6б–6д, 6ж) с возрастанием SiO₂. При этом содержания Na₂O и P₂O₅ (см. рис. 6е, 6з) практически не меняются. Диапазон SiO₂ в породах постройки стратовулкана максимальный в сравнении с другими комплексами. Наиболее кислые разности пород с кремнеземом 53%–56% наблюдаются именно в лавах стратовулкана, с чем, вероятно, связано широкое развитие безоливиновых разностей внутри этого комплекса пород. Породы даек на диаграммах Харкера расположены в поле пород стратовулкана и являются дериватами того же мантийного источника, что и постройка стратовулкана (см. рис. 6).

Лавы моногенных конусов отличаются от двух описанных комплексов. На диаграммах они формируют отдельное поле, зачастую не пересекающееся с полем фигуративных точек постройки. По сравнению с породами стратовулкана и даек, лавы моногенных конусов при близком содержании SiO₂ обогащены MgO и CaO, но обеднены FeO, TiO₂, Al₂O₃ и P₂O₅. В целом этот комплекс пород менее щелочной, что ярче проявлено в распределении Na₂O (см. рис. 6е) и менее — в распределении K₂O (см. рис. 6а). Породы моногенных конусов не формируют четко-выраженных трендов на диаграмме Харкера, а образуют поле точек с определенными вариациями по разным элементам. Именно к этому комплексу относятся самые магнезиальные разности пород среди всех изученных (см. рис. 6ж).

6. СРАВНЕНИЕ С ПОРОДАМИ СОСЕДНИХ ВУЛКАНОВ

6.1. Сравнение пород вулканов Камень и Плоские сопки

В сравнении с породами вулкана Камень лавы вулкана Плоские сопки систематически обогащены по калию (рис. 7а) и по фосфору (см. рис. 7б). Различия в содержании этих элементов настолько существенны, что поля фигуративных точек этих двух вулканов на диаграммах даже не пересекаются. Хотя соответствующие диаграммы не приводятся, отметим, что породы вулкана Плоские сопки также обеднены по Al₂O₃ и MnO относительно пород Камня.

Минералогический состав темноцветных минералов из магнезиального базальта вулкана Плоские сопки довольно близок составу минералов стратовулкана Камень: оливины варьируют от Fo₇₀ до Fo₉₀ и имеют одномодальное распределение с максимумом в Fo₈₀ (см. рис. 4к). Магнезиальный номер Mg# клинопироксенов изменяется от 60 до 88 и также имеет одномодальное распределение с максимумом 75 (см. рис. 4л) [Чурикова, 1993; Чурикова и др., 2009]. Несмотря на сходство

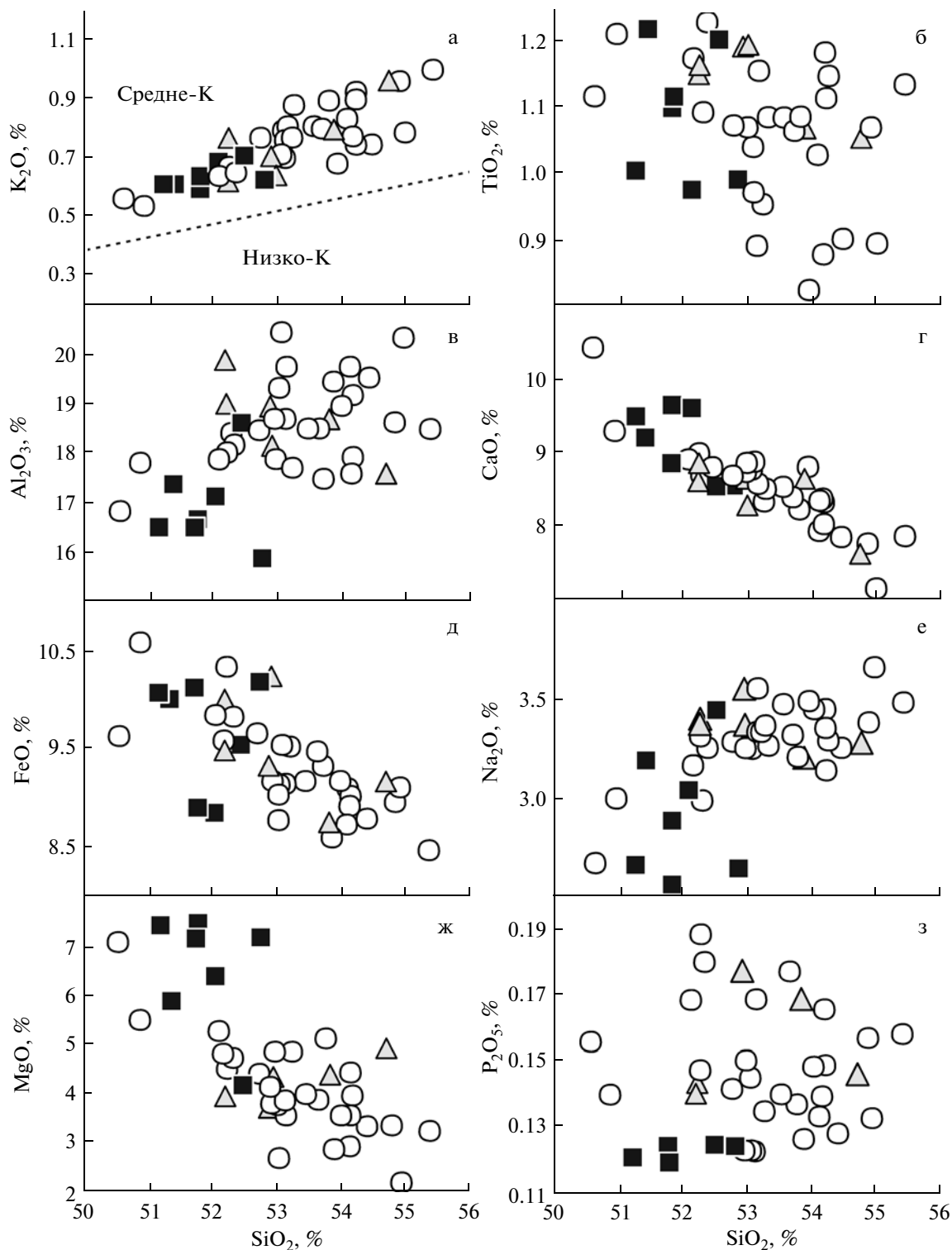


Рис. 6. Диаграмма Харкера для пород вулкана Камень. Условные обозначения см. рис. 2.

макросоставов, оливины вулкана Плоские сопки систематически и значительно отличаются не только от оливинов пород вулкана Камень, но и от оливинов всех других пород ЦКД высокими

содержаниями Са при одинаковых значениях форстерита. Аналогичные высокие значения Са появляются только в наиболее железистых оливинах вулканов Камень и Безымянный (рис. 8).

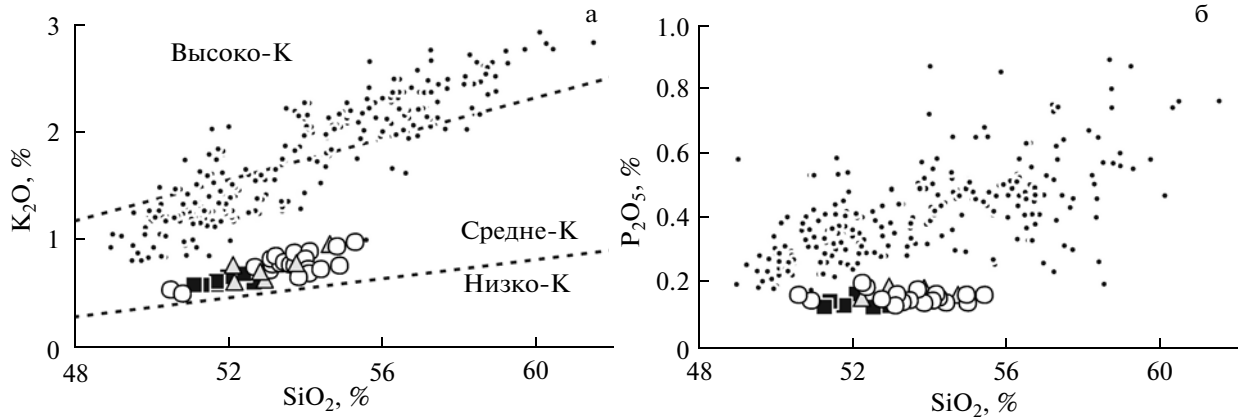


Рис. 7. Диаграммы зависимостей K_2O (а) и P_2O_5 (б) от SiO_2 в породах вулканов Камень и Плоские Сопки. Точками показаны составы пород вулкана Плоские Сопки по данным [Чурикова, 1993]. Другие символы такие же, как на рис. 2.

На основании приведенных данных по макро-элементам в породах и минералах двух вулканов, следует считать, что породы вулканов Камень и Плоские сопки не могли формироваться из единого первичного расплава.

6.2. Сравнение пород вулканов Камень и Ключевской

Все породы Ключевского вулкана на основании содержаний MgO и Al_2O_3 могут быть разделены на 3 основные группы (в т.ч. [Хренов и др., 1991; Миронов, 2009 и многие другие]): высокоглиноземистые базальты (ВГБ), умеренномагнезиальные базальты (УМБ) и высокомагнезиальные базальты (ВМБ). Эти три группы хорошо разделяются на большинстве петрологических диаграмм (рис. 9).

Тренд кристаллизации пород вулкана Камень, включающий породы стратовулкана и даек, пересекает тренд кристаллизации пород Ключевского вулкана, и лишь при $SiO_2 = 53\% - 55\%$ породы постройки стратовулкана Камень попадают в поле ВГБ Ключевского вулкана (см. рис. 9). Пересечение трендов наглядно видно на рисунках 9б и 9в, но при детальном рассмотрении его можно обнаружить на всех диаграммах. В породах Ключевского вулкана MgO стремительно падает с понижением SiO_2 и уменьшается от 12% до 3.5% в интервале SiO_2 от 51% до 54.5% в то время, как в лавах вулкана Камень MgO понижается лишь незначительно, уменьшаясь вдвое (от 7% до 3.5%) при более широком интервале SiO_2 от 50% до 56% (см. рис. 9в). Поведение же титана противоположно в этих сериях пород: в лавах Ключевского вулкана титан растет при фракционной кристаллизации в то время, как в породах вулкана Камень — падает (см. рис. 9б).

Два тренда пересекаются в поле ВГБ Ключевского вулкана (Рис. 9б, 9в), что могло бы предполагать общность пород стратовулкана Камень и ВГБ Ключевского вулкана. Составы оливинов (см. рис. 4а и 4н) и пироксенов (см. рис. 4б и 4о) в этих породах также близки по содержанию петрогенных окислов. Тем не менее, породы стратовулкана Камень и ВГБ Ключевского вулкана систематически различаются по содержаниям малых элементов в минералах: оливины стратовулкана Камень имеют низкие отношения NiO/CaO , по сравнению с оливинами ВГБ Ключевского вулкана (см. рис. 5а). Аналогичные различия наблюдаются и в содержаниях малых элементов в пироксенах для двух групп пород: пироксены стратовулкана Камень имеют низкие отношения Na_2O/TiO_2 , в сравнении с пироксенами ВГБ Ключевского вулкана (см. рис. 5б).

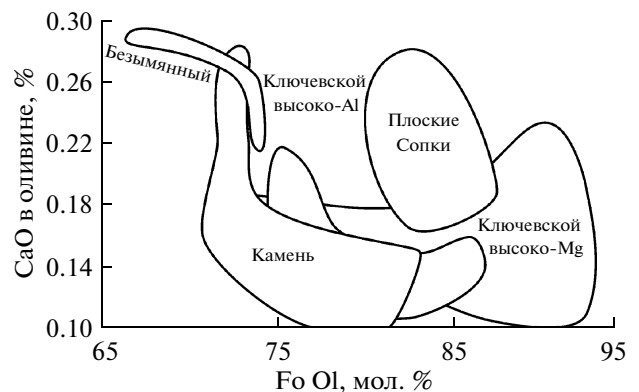


Рис. 8. Диаграмма CaO — Fo для оливинов пород Ключевской группы вулканов.

Наблюдается четкий тренд от в. Ключевского через в. Камень к в. Безымянному. Оливины в. Плоские Сопки лежат в стороне от этого тренда. Fo — состав оливина (мол. %).

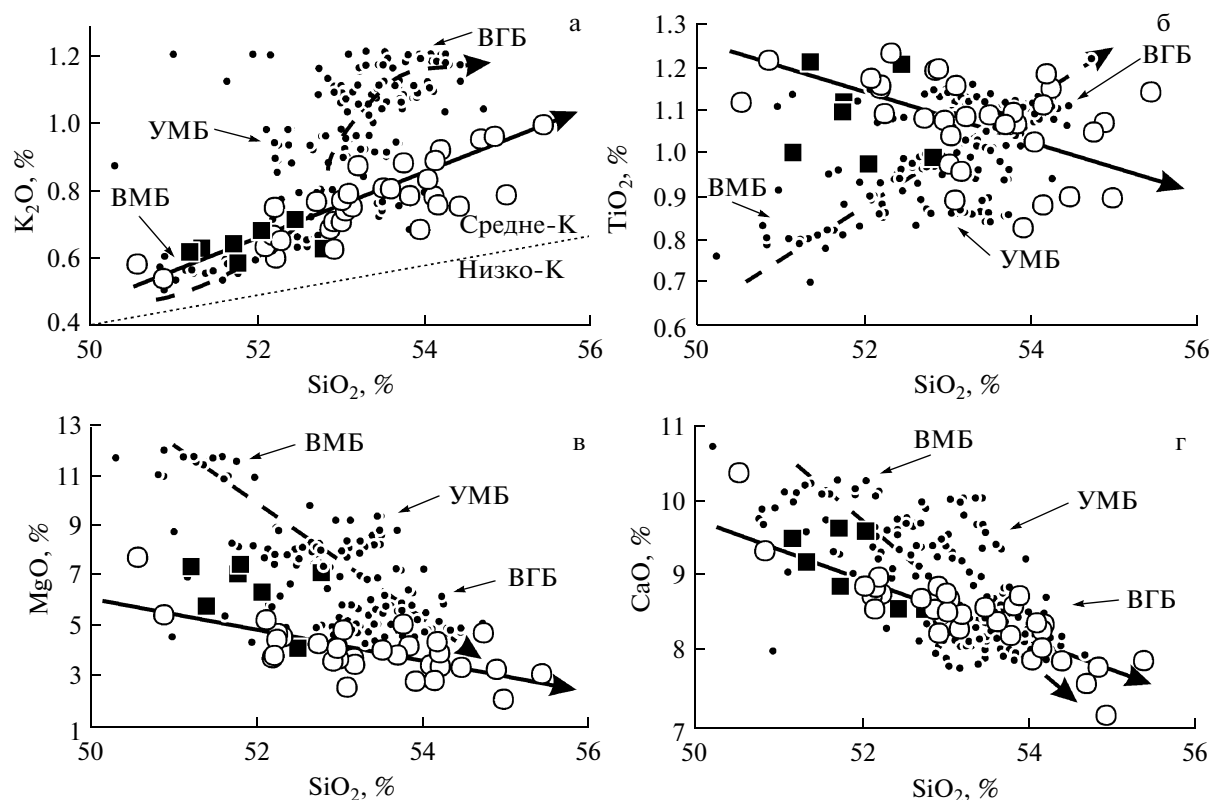


Рис. 9. Диаграммы зависимости SiO_2 от других макроэлементов в породах вулканов Камень и Ключевской.

Точками показаны составы пород вулкана Ключевской, взятые из базы данных [Portnyagin et al., 2007]. ВГБ – высокоглиноземистые породы Ключевского вулкана; УМБ – умеренномагнезиальные породы Ключевского вулкана; ВМБ – высокомагнезиальные породы Ключевского вулкана. Другие символы такие же, как на рис. 2.

Пород, аналогичных ВМБ Ключевского вулкана, на Камне не обнаружено. Что касается УМБ Ключевского вулкана, то породы моногенных конусов вулкана Камень на всех диаграммах попадают в поле УМБ Ключевского вулкана. Выше было показано, что составы минералов пород моногенных конусов значительно отличается от составов минералов пород стратовулкана Камень. Однако составы минералов пород моногенных конусов Камня и УМБ Ключевского вулкана довольно схожи: УМБ Ключевского вулкана содержат оливин Fo_{75-92} с максимумом Fo_{88-91} (см. рис. 4р) и клинопироксены с $\text{Mg}\#_{75-91}$ с максимумами при $\text{Mg}\#_{81}$ и $\text{Mg}\#_{87}$ (см. рис. 4с); лавы моногенных конусов вулкана Камень содержат оливин Fo_{70-92} с максимумом в Fo_{88} (см. рис. 4ж) и клинопироксены с $\text{Mg}\#_{72-80}$ с максимумом при $\text{Mg}\#_{79}$ (см. рис. 4з).

Полученные данные показывают, что породы стратовулкана Камень и Ключевского вулкана не являются дериватами единого первичного расплава, в то время, как моногенные конуса и УМБ Ключевского вполне могли иметь единый первичный расплав. Таким образом, моногенные конуса, расположенные в 3-ЮЗ секторе вулкана Камень, являются побочными конусами Ключев-

ского вулкана. Об этом же свидетельствуют их возраст – около 2 ^{14}C тыс. лет назад по устному сообщению В.В. Пономарёвой и их нахождение в зоне ареального вулканизма Ключевского вулкана, расстояние от его вершины до конусов составляет 9–14 км.

6.3. Сравнение пород вулканов Камень и Безымянный

Породы стратовулканов Камень и Безымянный формируют единый тренд на всех петрологических диаграммах. Лавы стратовулкана Камень составляют более основную часть этого тренда, представленную базальтами и андезибазальтами, а породы вулкана Безымянный формируют его более кремнистое продолжение, представленное андезибазальтами, андезитами и дацитами (рис. 10).

Составы темноцветных минералов пород вулкана Безымянный смещены в более железистую область по сравнению с минералами пород вулкана Камень. При этом на диаграмме зависимости содержания CaO в оливинах от форстерита составы минералов вулкана Безымянный также наращивают тренд составов минералов из пород

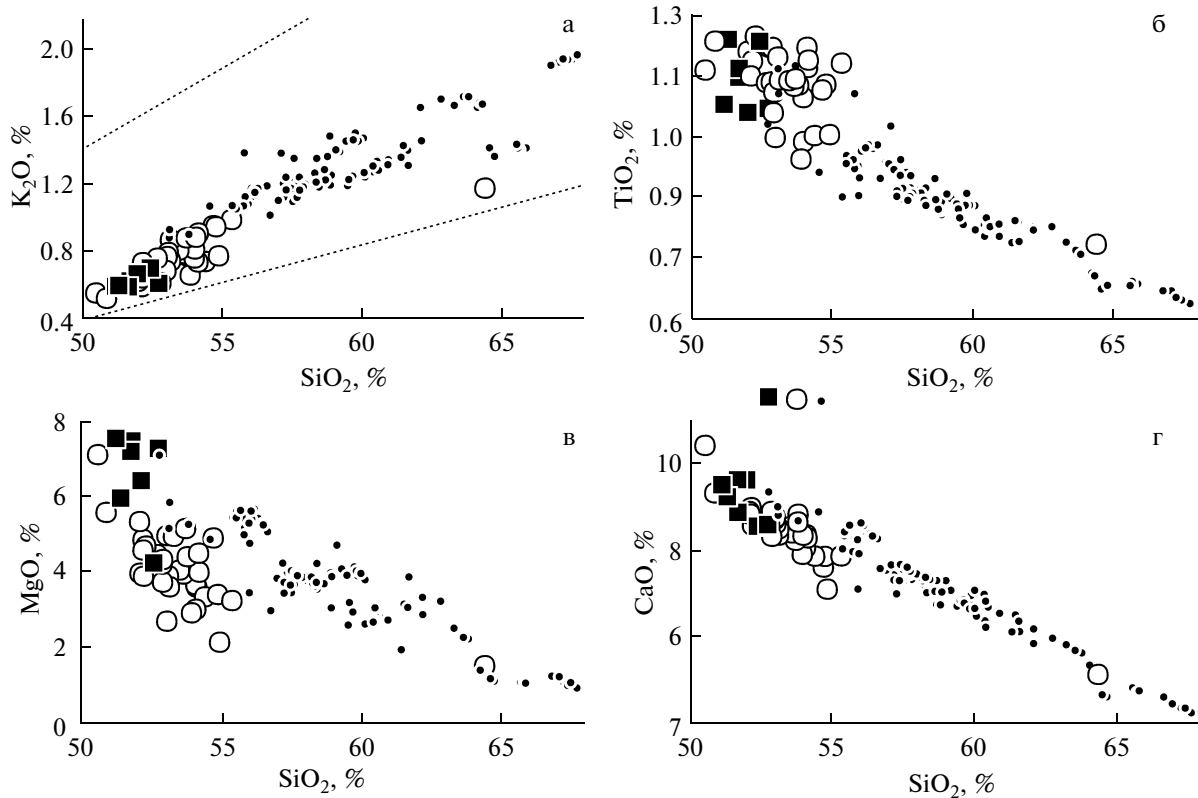


Рис. 10. Диаграммы зависимости SiO_2 от других макроэлементов в породах вулканов Камень и Безымянный. Точками показаны составы пород вулкана Безымянный, взятые из базы данных [Portnyagin et al., 2007]. Символы такие же, как на рис. 2.

вулкана Камень, формируя его наиболее высококальциевую область (см. рис. 8).

О близком родстве вулканов Безымянный и Камень свидетельствует и появление роговообманковых пород на поздних этапах эволюции вулкана Камень как среди поздних лав стратовулкана, так и в породах дайкового комплекса. Больше развитие роговообманковые андезиты приобрели в породах вулкана Безымянный.

Взаимосвязь вулканов Ключевской группы прослеживается и на P - T диаграмме, построенной по валовым составам пород ЦКД (рис. 11). Температуры кристаллизации пород рассчитывались по модели [Albarede, 1992], а давления – по модели [Putirka, 2008]. На диаграмме хорошо видно, что породы Плоских сопки занимают обособленное место среди всех изученных вулканов ЦКД и кристаллизовались при более высоких давлениях. ВГБ, УМБ и ВМБ Ключевского вулкана занимают три области, при этом ВМБ кристаллизовались при самых высоких температурах и давлениях ($T = 1320\text{--}1350^\circ\text{C}$, $P = 10\text{--}12$ кбар), УМБ и ВГБ кристаллизовались на близких глубинах ($P = 6\text{--}8$ кбар), но при разных температурах ($T = 1200\text{--}1270^\circ\text{C}$ для УМБ и $T = 100\text{--}1200^\circ\text{C}$ для ВГБ). Фигуративные точки пород моногенных конусов расположены в поле УМБ Ключевского

вулкана, что подтверждает их генетическое родство. Породы даек и стратовулкана Камень и вулкана Безымянного находятся на одном тренде, причем породам Камня соответствуют более высокие температуры и давления ($T = 1100\text{--}1200^\circ\text{C}$, $P = 4\text{--}8$ кбар), чем вулкану Безымянному ($T = 1050\text{--}1150^\circ\text{C}$, $P = 1\text{--}4$ кбар). (см. рис. 11).

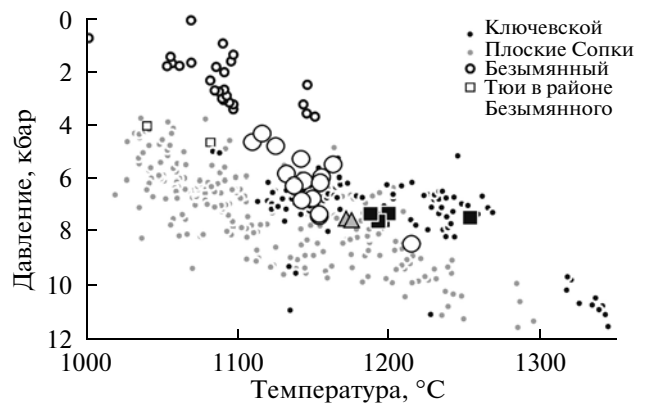


Рис. 11. P - T диаграмма для пород вулканов ЦКД. Температуры рассчитывались по модели [Albarede, 1992], а давления – по модели [Putirka, 2008] по валовому составу пород. Другие символы такие же, как на рис. 2.

Таблица 2. Макроэлементы в породах вулкана Камень

Образец	2311	КАМ-07-03	КАМ-08-14	КАМ-08-01	КАМ-08-68	КАМ-08-20
Комплекс	конус	конус	конус	конус	конус	конус
Широта (N)	55°57'54"	55°58'4.2"	55°59'59.7"	56°0'1.9"	55°59'50.5"	56°0'7"
Долгота (E)	160°27'8.7"	160°31'32.1"	160°29'19.3"	160°30'46"	160°29'58.5"	160°20'15.8"
SiO ₂ %	51.82	52.90	51.80	52.20	50.90	51.00
TiO ₂ %	0.97	1.10	1.19	0.98	1.10	1.21
Al ₂ O ₃ %	17.13	17.80	18.60	15.90	16.70	17.40
Fe ₂ O ₃ %	6.65	3.01	3.95	3.75	2.95	4.64
FeO%	2.84	6.12	5.90	6.70	6.12	5.76
MnO%	0.17	0.15	0.15	0.16	0.16	0.16
CaO%	9.61	8.71	8.56	8.57	9.65	9.21
MgO%	6.41	5.18	4.21	7.21	7.44	5.90
Na ₂ O%	3.04	3.05	3.46	2.65	2.54	3.19
K ₂ O%	0.68	0.50	0.71	0.62	0.59	0.61
P ₂ O ₅ %	0.16	0.14	0.13	0.12	0.12	0.14
ппп	0.43	0.57	0.69	0.74	0.80	0.56
Сумма	99.91	99.23	99.35	99.61	99.06	99.78
Образец	КАМ-08-15	КАМ-08-67/1	КАМ-08-11	КАМ-08-50	КАМ-08-А1	КАМ-08-84
Комплекс	конус	конус	дайка	дайка	дайка	дайка
Широта (N)	56°0'14.8"	55°59'47.5"	56°0'11.4"	56°0'56.5"	55°58'54.2"	55°57'39.8"
Долгота (E)	160°31'20.2"	160°29'46.3"	160°32'45"	160°31'57.1"	160°41'12.6"	160°42'57.4"
SiO ₂ %	50.80	51.50	54.20	53.60	52.20	52.60
TiO ₂ %	1.00	1.09	1.04	1.06	1.17	1.18
Al ₂ O ₃ %	16.50	16.50	17.50	18.60	18.90	18.10
Fe ₂ O ₃ %	3.50	4.25	2.32	3.35	3.55	4.11
FeO%	6.85	6.26	6.98	5.68	5.97	6.45
MnO%	0.16	0.15	0.15	0.16	0.15	0.17
CaO%	9.51	8.86	7.58	8.61	8.58	8.25
MgO%	7.48	7.19	4.89	4.35	3.69	4.31
Na ₂ O%	2.66	2.89	3.27	3.18	3.55	3.35
K ₂ O%	0.61	0.63	0.95	0.78	0.69	0.63
P ₂ O ₅ %	0.12	0.13	0.15	0.17	0.18	0.16
ппп	0.75	0.65	0.87	0.60	0.61	0.77
Сумма	99.93	100.10	99.89	100.14	99.24	100.07
Образец	КАМ-08-52	КАМ-08-85	КАМ-08-30	2310	КАМ-08-13	КАМ-08А3
Комплекс	дайка	дайка	дайка	стратовулкан	стратовулкан	стратовулкан
Широта (N)	56°1'8.4"	55°57'39.8"	55°59'50"	55°57'54"	55°57'54"	55°59'7"
Долгота (E)	160°32'1.6"	160°42'57.4"	160°32'9.6"	160°27'8.7"	160°27'8.7"	160°40'9.9"
SiO ₂ %	51.90	51.90	63.80	50.52	50.40	52.56
TiO ₆ %	1.15	1.14	0.54	1.11	1.20	1.03
Al ₂ O ₃ %	18.90	19.80	17.10	16.82	17.80	17.90
Fe ₂ O ₃ %	3.89	4.36	5.72	6.93	4.20	4.54
FeO%	6.41	5.47		3.40	6.70	5.04
MnO%	0.16	0.16	0.10	0.19	0.17	0.16
CaO%	8.82	8.56	5.08	10.41	9.31	8.72
MgO%	3.88	3.88	1.50	7.10	5.54	4.88
Na ₂ O%	3.35	3.37	3.85	2.68	3.01	3.33
K ₂ O%	0.75	0.61	1.18	0.56	0.53	0.78
P ₂ O ₅ %	0.14	0.14	0.13	0.16	0.14	0.15
ппп	0.75	0.62	0.68	0.33	0.72	0.44
Сумма	100.11	100.01	99.68	100.19	99.72	99.52

Таблица 2. Продолжение

Образец	КАМ-08-37	КАМ-08-54	КАМ-08-08	КАМ-08-10	КАМ-08-07	КАМ-07-23
Комплекс	стратовулкан	стратовулкан	стратовулкан	стратовулкан	стратовулкан	стратовулкан
Широта (N)	55°59'52.5"	56°1'26.9"	56°0'4.1"	56°0'11.3"	56°0'2.9"	55°59'3.4"
Долгота (E)	160°32'8.8"	160°31'8.5"	160°32'34.4"	160°33'4"	160°32'22.2"	160°34'10.1"
SiO ₂ %	53.50	52.50	55.10	53.50	51.90	50.80
TiO ₂ %	1.08	0.96	1.13	1.10	1.14	1.17
Al ₂ O ₃ %	17.50	19.30	18.50	17.60	18.10	19.40
Fe ₂ O ₃ %	3.61	4.36	3.48	4.12	3.72	4.88
FeO%	6.05	5.04	5.32	5.26	6.91	5.40
MnO%	0.15	0.15	0.15	0.15	0.17	0.17
CaO%	8.21	8.81	7.86	8.35	8.75	9.03
MgO%	5.14	3.75	3.26	4.45	4.82	4.85
Na ₂ O%	3.21	3.25	3.49	3.15	3.00	3.25
K ₂ O%	0.89	0.70	0.99	0.90	0.65	0.49
P ₂ O ₅ %	0.14	0.12	0.16	0.17	0.15	0.14
ппп	0.84	0.57	0.57	0.82	0.76	0.57
Сумма	100.32	99.51	100.01	99.56	100.06	100.14
Образец	КАМ-08-05	КАМ-08-02	КАМ-08-39	КАМ-08-40-1	КАМ-08-24	КАМ-08-22
Комплекс	стратовулкан	стратовулкан	стратовулкан	стратовулкан	стратовулкан	стратовулкан
Широта (N)	55°59'55.5"	56°0'47.7"	56°1'21.3"	56°1'21.3"	56°1'15"	56°1'1.7"
Долгота (E)	160°31'53"	160°30'42.2"	160°31'48.8"	160°31'52"	160°32'53.7"	160°31'11.8"
SiO ₂ %	51.90	52.80	54.00	53.80	54.40	54.30
TiO ₂ %	1.22	1.15	1.18	0.89	0.89	1.06
Al ₂ O ₃ %	18.10	18.70	19.10	19.50	20.30	18.60
Fe ₂ O ₃ %	4.58	3.35	4.33	4.00	3.55	3.26
FeO%	5.62	6.48	5.04	5.11	5.83	5.96
MnO%	0.17	0.16	0.16	0.16	0.15	0.15
CaO%	8.79	8.56	8.04	7.85	7.11	7.77
MgO%	4.69	3.87	3.58	3.36	2.17	3.38
Na ₂ O%	3.26	3.33	3.35	3.26	3.66	3.39
K ₂ O%	0.64	0.80	0.74	0.75	0.78	0.95
P ₂ O ₅ %	0.18	0.17	0.14	0.13	0.13	0.16
ппп	0.67	0.69	0.59	0.58	0.75	0.87
Сумма	99.82	100.06	100.24	99.38	99.72	99.85
Образец	КАМ-08-16	КАМ-08-06	КАМ-08-29	КАМ-08-26	КАМ-08-61	КАМ-08-04
Комплекс	стратовулкан	стратовулкан	стратовулкан	стратовулкан	стратовулкан	стратовулкан
Широта (N)	56°0'4.5"	55°59'55"	56°1'15.9"	56°1'16.2"	56°1'33.4"	55°59'54.2"
Долгота (E)	160°31'31.9"	160°31'58.2"	160°32'36.9"	160°32'41.5"	160°33'31.4"	160°31'53.3"
SiO ₂ %	53.40	51.70	53.80	52.80	53.30	51.90
TiO ₂ %	1.13	1.08	0.87	0.81	1.08	1.17
Al ₂ O ₃ %	17.90	18.40	19.70	19.40	18.50	17.90
Fe ₂ O ₃ %	3.11	4.15	4.95	3.55	4.19	4.75
FeO%	6.19	5.75	4.25	5.26	5.40	5.54
MnO%	0.15	0.16	0.15	0.15	0.16	0.16
CaO%	8.28	8.98	8.35	8.79	8.52	8.89
MgO%	3.99	4.54	2.96	2.88	4.02	5.28
Na ₂ O%	3.30	3.31	3.45	3.49	3.47	3.18
K ₂ O%	0.91	0.66	0.76	0.67	0.80	0.63
P ₂ O ₅ %	0.15	0.19	0.13	0.13	0.14	0.17
ппп	0.87	0.61	0.75	0.55	0.64	0.61
Сумма	99.38	99.53	100.13	98.48	100.22	100.18

Таблица 2. Окончание

Образец	КАМ-08-60	КАМ-08-38	КАМ-08-31	КАМ-08-64	КАМ-08-43	КАМ-08-23
Комплекс	стратовулкан	стратовулкан	стратовулкан	стратовулкан	стратовулкан	стратовулкан
Широта (N)	56°1'39.5''	56°0'53.6''	55°59'51.5''	56°1'33.7''	56°1'15.2''	56°1'6.1''
Долгота (E)	160°33'14.8''	160°30'36.3''	160°32'7.4''	160°33'31.5''	160°33'31.6''	160°31'14.9''
SiO ₂ %	52.80	53.50	52.90	53.60	52.50	52.50
TiO ₂ %	0.95	1.06	1.08	1.02	0.88	1.06
Al ₂ O ₃ %	19.70	18.50	17.70	18.90	20.40	18.70
Fe ₂ O ₃ %	3.90	4.35	3.75	4.21	3.99	3.75
FeO%	5.62	5.54	6.10	5.33	5.11	5.76
MnO%	0.15	0.16	0.15	0.16	0.14	0.15
CaO %	8.31	8.38	8.48	7.89	8.73	8.84
MgO%	3.59	3.88	4.88	3.61	2.68	4.21
Na ₂ O%	3.37	3.32	3.27	3.45	3.56	3.26
K ₂ O%	0.76	0.79	0.88	0.83	0.75	0.71
P ₂ O ₅ %	0.12	0.18	0.14	0.15	0.12	0.15
ппп	0.60	0.44	0.82	0.64	0.58	0.68
Сумма	99.88	100.10	100.14	99.78	99.45	99.77
Образец	КАМ-08-59	КАМ-08-97	КАМ-08-88	КАМ-08-98	КАМ-08-87	КАМ-08-92
Комплекс	стратовулкан	стратовулкан	стратовулкан	стратовулкан	стратовулкан	Амбон
Широта (N)	56°1'48.2''	55°57'49.7''	55°57'46.5''	55°57'47.3''	55°57'33''	55°57'40.8''
Долгота (E)	160°31'40.3''	160°40'57.8''	160°41'51''	160°40'38.8''	160°42'44.5''	160°45'16.7''
SiO ₂ %	52.50	52.60	54.40	50.90	54.00	62.50
TiO ₂ %	1.07	0.98	1.06	1.15	1.09	0.72
Al ₂ O ₃ %	18.40	19.80	18.30	19.30	18.90	17.30
Fe ₂ O ₃ %	4.87	3.55	3.12	4.10	3.36	3.97
FeO%	5.26	5.54	6.12	5.95	6.48	1.94
MnO%	0.16	0.15	0.15	0.16	0.15	0.10
CaO%	8.66	8.66	8.24	9.12	7.28	5.28
MgO%	4.42	2.96	3.21	3.99	3.58	2.56
Na ₂ O%	3.29	3.48	3.37	3.12	3.53	3.37
K ₂ O%	0.76	0.80	1.02	0.59	0.84	1.25
P ₂ O ₅ %	0.14	0.14	0.18	0.13	0.16	0.15
ппп	0.54	0.69	0.63	0.75	0.67	0.68
Сумма	100.07	99.34	99.79	99.26	100.04	99.82
Образец	КАМ-08-94	КАМ-08-93	КАМ-07-01	КАМ-07-04	КАМ-07-11	
Комплекс	Амбон	Амбон	Тюя Кулич	стратовулкан	конус	
Широта (N)	55°57'24.9''	55°56'48.8''	55°57'57.8''	55°58'52.7''	55°59.899''	
Долгота (E)	160°42'8.4''	160°43'53''	160°30'58.9	160°33'20.3''	160°30.275''	
SiO ₂ %	51.70	54.20	60.10	55.80	52.08	
TiO ₂ %	1.04	1.13	0.59	0.93	0.98	
Al ₂ O ₃ %	17.80	17.50	18.22	17.93	16.06	
Fe ₂ O ₃ %	4.86	4.26	2.88	3.41	4.00	
FeO%	5.47	5.26	4.10	4.75	5.62	
MnO%	0.16	0.15	0.16	0.15	0.15	
CaO%	8.63	8.48	6.59	7.76	8.95	
MgO%	5.17	4.21	1.79	4.21	8.52	
Na ₂ O%	3.22	3.24	3.79	3.21	2.59	
K ₂ O%	0.87	0.95	0.89	0.84	0.51	
P ₂ O ₅ %	0.13	0.15	0.26	0.17	0.13	
ппп	0.68	0.62	0.46	0.44	0.58	
Сумма	99.73	100.14	99.83	99.60	100.16	

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наши исследования позволили не только получить сведения о петролого-геохимической систематике пород вулкана Камень, но и понять его взаимосвязь с соседними вулканами. Первые данные по содержаниям макро- и микроэлементов в породах и минералах Камня показали, что стратовулкан и дайки не имеют общих первичных расплавов с вулканами Плоские сопки и Ключевской. В то же время вполне очевидна генетическая связь пород вулкана Камень с породами Безымянного. Это может объясняться тем, что вулкан Безымянный наследует сместившийся к югу и занявший приповерхностное положение магматический очаг вулкана Камень.

Также не был ясен вопрос о генезисе многочисленных моногенных шлако-лавовых конусов, широко развитых на западном и юго-западном склонах вулкана Камень. Наши данные свидетельствуют о том, что эти конуса фактически являются конусами Ключевского вулкана и соответствуют составу пород и минералов его УМБ.

Ниже в краткой форме излагаются результаты выполненных исследований.

По петрографическим особенностям породы вулкана Камень можно разделить на четыре группы, включающие 7 типов пород. Это оливин-содержащие (типы 1 и 2), безоливиновые (типы 3–5), субафировые (тип 6) и роговообманко-содержащие (тип 7) породы.

Оливин-содержащие породы встречаются во всех вулканических комплексах вулкана. Безоливиновые породы, наоборот, встречаются только в постройке стратовулкана и отсутствуют в других вулканических комплексах. Наибольшее разнообразие пород наблюдается в постройке стратовулкана, здесь отмечаются все указанные типы пород. Лавы моногенных конусов представлены оливин-содержащими и субафировыми породами, а породы дайкового комплекса – оливин-содержащими и роговообманко-содержащими разновидностями.

Все породы вулкана Камень относятся к умеренно-К субщелочным базальт-андезибазальтовым сериям;

Лавы стратовулкана являются высокоглиноземистыми низкомагнезиальными ($MgO \leq 7\%$, $SiO_2 \sim 50–56\%$) разновидностями базальт-андезибазальтового ряда и формируют устойчивые тренды на петрохимических диаграммах.

Породы даек на петрохимических диаграммах расположены в поле пород стратовулкана, имеют сходный с ними состав минералов, и являются дериватами тех же мантийных источников, что и постройка стратовулкана.

Лавы моногенных конусов являются высокомагнезиальными андезибазальтами ($MgO > 6\%$,

$SiO_2 \sim 52–53\%$) и систематически отличаются от пород стратовулкана по составам макроэлементов и породообразующих минералов.

Породы вулканов Камень и Плоские сопки систематически различаются по химическому составу пород и минералов, они не могли формироваться из единых первичных расплавов.

Лавы моногенных конусов вулкана Камень и умеренно-магнезиальные базальты Ключевского вулкана являются дериватами единых расплавов.

Породы даек и стратовулкана Камень и породы Ключевского вулкана формируют разнонаправленные тренды на петрохимических диаграммах и различаются по составам породообразующих минералов, т.е. не обнаруживают генетического родства.

Породы стратовулканов Камень и Безымянный формируют на всех петрохимических диаграммах узкий единый тренд, в котором лавы Безымянного составляют обогащенную по SiO_2 ветвь, что указывает на генетическую связь вулканов.

Начальный период развития постройки вулкана Камень был связан с активной взрывной деятельностью, в результате чего сформировался крупный насыпной конус; на более поздних стадиях развития вулкан имел существенно эффузивный характер извержений.

Внутренние части вулканической постройки характеризуются сильными вторичными изменениями, которые усиливаются к центру и уменьшаются к флангам, что, вероятно, связано с активными температурными и/или гидротермальными потоками через центральный канал вулкана.

Амбонская толща представляет собой разрушенный материал внутренних, вторично измененных частей постройки.

Свежий неизменный материал начального этапа развития вулкана Камень доступен только на его крайних флангах.

Авторы благодарны сотрудникам ИВиС ДВО РАН, способствовавшим успешному осуществлению полевых работ на вулкане Камень: Бограду О.Е., Демянчуку Ю.В., Егоровой Н.П., Мелекесцеву И.В., Муравьеву Я.Д., Озерову А.Ю., Ушакову С.В., Федуловой В.П., Ящику В.В. Особые слова признательности мы хотим сказать альпинистам-волонтерам, принявшим участие в экспедиции – Ярину М.М. (Москва) и Боярских Е.Ю. (Екатеринбург), а также Избекову П. и Кириленко А.С. Мы также благодарны студентам МГУ Лебедеву И.А. и Грибань А.А. за определения составов минералов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 08-05-00600.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Альмеев Р.Р.* Геохимия магматизма вулкана Безымянный: признаки мантийного источника и условия фракционирования исходной магмы // Автореф. дисс. ... кандидата геол.-мин. наук. М.: Ин-т геохимии и аналитической химии РАН, 2005. 26 с.
- Брайцева О.А., Мелекесцев И.В., Богоявленская Г.Е., Максимов А.П.* Вулкан Безымянный: история формирования и динамика активности // Вулканология и сейсмология. 1990. № 2. С. 3–22.
- Ермаков В.А.* Отложения направленного взрыва вулкана Камень // Вулканы и извержения. М.: Наука, 1969. С. 82–93.
- Ермаков В.А.* Формационное расчленение четвертичных вулканических пород. М.: Недра, 1977. 223 с.
- Иванов Б.В.* Андезиты Камчатки: справочник химических анализов вулканитов и основных породобразующих минералов. М.: Наука, 2008. 470 с.
- Мелекесцев И.В.* Вулканизм и рельефообразование. М.: Наука, 1980. 212 с.
- Мелекесцев И.В., Брайцева О.А.* Гигантские обвалы на вулканах // Вулканология и сейсмология. 1984. № 4. С. 14–23.
- Мелекесцев И.В., Вольнец О.Н., Ермаков В.А. и др.* Вулкан Шивелуч // Действующие вулканы Камчатки. Т. 1. М.: Наука, 1991. С. 82–97.
- Миронов Н.Л.* Происхождение и эволюция магм Ключевского вулкана, Камчатка, по данным изучения расплавленных включений в оливине // Автореф. дисс. ... кандидата геол.-мин. наук. М.: Ин-т геохимии и аналитической химии РАН, 2009. 31 с.
- Миронов Н.Л., Портнягин М.В., Плечов П.Ю., Хубуная С.А.* Заключительные этапы эволюции магм Ключевского вулкана (Камчатка) по данным изучения расплавленных включений в минералах высокоглиноземистых базальтов // Петрология. 2001. Т. 9. № 1. С. 51–69.
- Озеров А.Ю.* Эволюция базитовых расплавов в питающей системе Ключевского вулкана // Петрология и металлогения базит-гипербазитовых комплексов Камчатки. Петропавловск-Камчатский, 2000. С. 58–60.
- Токарев П.И., Зобин В.М.* Особенности распространения сейсмических волн близких землетрясений в земной коре и верхней мантии в районе Ключевской группы вулканов Камчатки // Бюллетень вулканологических станций. 1970. № 4. С. 17–23.
- Флёров Г.Б., Овсянников А.А.* Вулкан Ушковский // Действующие вулканы Камчатки. Т. 1. М.: Наука, 1991. С. 154–163.
- Хренов А.П.* Современный базальтовый вулканизм Камчатки (результаты аэрокосмических и петрологических исследований) // Автореф. дисс. ... доктора геол.-мин. наук. М.: ИГЕМ РАН, 2003. 40 с.
- Хренов А.П., Антипин В.С., Чувашова Л.А., Смирнова Е.Б.* Петрохимические особенности базальтов Ключевского вулкана // Вулканология и сейсмология. 1989. № 3. С. 3–15.
- Хренов А.П., Двигалов В.Н., Кирсанов И.Т. и др.* Вулкан Ключевской // Действующие вулканы Камчатки. Т. 1. М.: Наука, 1991. С. 104–145.
- Чурикова Т.Г.* Геохимия и моделирование магматического процесса вулканов Ключевской группы // Автореф. дисс. ... кандидата геол.-мин. наук. М.: МГУ, 1993. 23 с.
- Чурикова Т.Г., Гордейчик Б.Н., Иванов Б.В., Максимов А.П.* Некоторые аспекты геологического строения вулкана Камень // Материалы Всероссийской конференции, посвященной 75-летию Камчатской вулканологической станции. Петропавловск-Камчатский: Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 2010. http://www.tachurikova.narod.ru/churikova_2010e.pdf.
- Чурикова Т.Г., Гордейчик Б.Н., Иванов Б.В., Максимов А.П.* Петрохимия и минералогия пород вулкана Камень (Камчатка) // Вулканизм и геодинамика. Материалы IV Всероссийского симпозиума по вулканологии и палеовулканологии. Т. 1. Петропавловск-Камчатский: Ин-т вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 2009. С. 224–227.
- Albarede F.* How deep do common basaltic magmas form and differentiate? // Journal of Geophysical Research. 1992. V. 97(B7). P. 10997–11009.
- Calkins J.A.* ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology of Khapitsa plateau and Studyonaya river basalts and basaltic andesites in Central Kamchatka Depression, Kamchatka, Russia // Взаимосвязь между тектоникой, сейсмичностью, магмообразованием и извержениями вулканов в вулканических дугах. Материалы IV Международного совещания по субдукционным процессам в Японской, Курило-Камчатской и Алеутской островных дугах. Петропавловск-Камчатский, 21–27 августа 2004 г. Петропавловск-Камчатский: Ин-т вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 2004. С. 53–54.
- Churikova T., Dorendorf F., Wörner G.* Sources and fluids in the mantle wedge below Kamchatka, evidence from across-arc geochemical variation // Journal of Petrology. 2001. V. 42. № 8. P. 1567–1593.
- Churikova T., Wörner G., Mironov N., Kronz A.* Volatile (S, Cl and F) and fluid mobile trace element compositions in melt inclusions: implications for variable fluid sources across the Kamchatka arc // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2007. V. 154. № 2. P. 217–239.
- Dorendorf F., Wiechert U., Wörner G.* Hydrated sub-arc mantle: a source for the Kluchevskoy volcano, Kamchatka/Russia // Earth and Planetary Science Letters. 2000. V. 175. P. 69–86.
- Ginibre C., Kronz A., Wörner G.* High-resolution quantitative imaging of plagioclase composition using accumulated backscattered electron images: new constraints on oscillatory zoning // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2002. V. 142. P. 436–448.
- Kersting A.B., Arculus R.J.* Pb isotope composition of Klyuchevskoy volcano, Kamchatka and North Pacific sediments: Implications for magma genesis and crustal recycling in the Kamchatkan arc // Earth and Planetary Science Letters. 1995. V. 136. P. 133–148.
- Ozawa K.* Olivin-spinel geospeedometry: analysis of diffusion-controlled Mg-Fe²⁺ exchange // Geochim. et Cosmochim. Acta. 1984. V. 48. P. 2597–2611.
- Pineau F., Semet M.P., Grassineau N. et al.* The genesis of the stable isotope (O, H) record in arc magmas: the Kamchatka's // Chemical Geology. 1999. V. 135. P. 93–124.
- Ponomareva V.V., Melekestsev I.V., Dirksen O.V.* Sector collapses and large landslides on Late Pleistocene–Holocene

volcanoes in Kamchatka, Russia // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2006. V. 158. P. 117–138.

Portnyagin M., Bindeman I., Hoernle K., Hauff F. Geochemistry of Primitive Lavas of the Central Kamchatka Depression: Magma Generation at the Edge of the Pacific Plate // *Volcanism and subduction: the Kamchatka region. Geophysical Monograph Series*. V. 172. Washington, DC: American Geophysical Union, 2007. P. 199–239.

Putirka K. Thermometers and Barometers for Volcanic Systems // *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 2008. V. 69. P. 61–120.

Reiche P. The toreva-block – a distinctive landslide type // *The Journal of Geology*. 1937. V. 45. P. 538–548.

Turner S., Sims K.W.W., Reagan M., Cook C. A ^{210}Pb – ^{226}Ra – ^{230}Th – ^{238}U study of Klyuchevskoy and Bezymianny volcanoes, Kamchatka // *Geochim. et Cosmochim. Acta*. 2007. V. 71. P. 4771–4785.

Petrochemistry of Kamen' Volcano: A Comparison with Neighboring Volcanoes of the Klyuchevskoi Group

T. G. Churikova^a, B. N. Gordeichik^b, and B. V. Ivanov^a

^a *Institute of Volcanology and Seismology, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, bul'var Piipa 9, Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006 Russia*
e-mail: tchurikova@mail.ru

^b *Institute of Experimental Mineralogy, Russian Academy of Sciences, ul. Institutskaya 4, Chernogolovka, 142432 Russia*
e-mail: gordei@mail.ru

Abstract—The data on geology, petrography, mineralogy and petrochemistry for Kamen' Volcano in the central Kamchatka depression are presented. A study of the volcano's rocks and comparison with rocks of neighboring active volcanoes of the Klyuchevskoi group allow the establishment of some relationships. The rocks and minerals of Kamen' and Ploskie Sopki volcanoes show systematic differences in the chemistry of rocks and minerals such that they obviously could not be formed from the same primary melts. The rocks of dykes and Kamen' stratovolcano on one hand and the rocks of the Klyuchevskoi Volcano on the other hand form differently directed trends on petrochemical diagrams and differ in their compositions of rock-forming minerals, such they also could not originate from the same primary melts. The lavas of the monogenetic cones of Kamen' Volcano and moderately magnesian basalts of Klyuchevskoi Volcano are derivatives of the same melts, i.e., the cones situated on the slopes of Kamen' are cones of Klyuchevskoi. The rocks of Kamen' and Bezymiannyi stratovolcanoes form a single narrow trend in all petrochemical diagrams in which the lavas of Bezymiannyi Volcano show a silica-rich branch, thus indicating a genetic relationship between these two volcanoes.