

УДК 551.21+551.79(235.132)+552.313.1+552.323.4

ПЕТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ЭКСТРУЗИВНЫХ ПОРОД ВУЛКАНА БЕЗЫМЯННЫЙ, КАМЧАТКА

© 2023 г. В. М. Ладыгин^а, О. А. Гирина^б *, Ю. В. Фролова^а

^аГеологический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

^бИнститут вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, бульвар Пийна, 9, Петропавловск-Камчатский, 683006 Россия
*e-mail: girina@kscnet.ru

Поступила в редакцию 09.12.2022 г.

После доработки 23.01.2023 г.

Принята к публикации 01.02.2023 г.

Впервые представлены результаты петрофизических исследований экструзивных пород вулкана Безымянный от дацитов до андезитов. Приведена сравнительная характеристика свойств пород экструзий согласно выделенным возрастным группам. Показана динамика изменения свойств пород экструзий в зависимости от их возраста: установлено, что чем древнее породы, тем выше показатели их плотностных, прочностных и упругих свойств. Проведено сопоставление петрофизических особенностей пород экструзивных куполов и лавовых потоков. Обоснована применимость петрофизических свойств для уточнения генезиса сходных по петрографическим характеристикам пород, в частности, экструзивного и эффузивного происхождения.

Ключевые слова: вулкан Безымянный, экструзивный купол, петрофизические свойства

DOI: 10.31857/S0203030623700177, **EDN:** TSVJWT

ВВЕДЕНИЕ

Под петрофизическими свойствами понимается комплекс физических и механических характеристик горной породы, которые определяются лабораторными методами на ее образцах, либо вычисляются. К ним относятся плотностные, водно-физические, акустические, тепловые, магнитные, электрические характеристики, а также прочностные и деформационные показатели. Последние традиционно называют физико-механическими (в инженерной геологии) или геомеханическими (в горных науках), однако по сути, они также являются физическими характеристиками, описывающими поведение горной породы в физическом поле механических напряжений [Грунтоведение, 2005]. Основными факторами, определяющими свойства горных пород, являются их химико-минеральный состав и строение (структура, текстура, пористость, трещиноватость). Очевидно, что петрофизические особенности вулканогенных пород зависят от термодинамических условий, в которых они были сформированы (условий плавления и кристаллизации магмы, ее состава) и последующих вторичных преобразований под влиянием различных геологических процессов. Таким образом, зная зависимости свойств от геологических факторов, можно решать и обратные задачи — использовать петро-

физические показатели для реконструкции геологических условий формирования горных пород. Исследованиям петрофизических свойств пород Северной группы вулканов Камчатки посвящено достаточно много работ (например, [Ладыгин, Никитин, 1980; Козырев, 1990; Гирина, 1998; Ладыгин, Округин, 1998; Ладыгин и др., 2001, 2010, 2012, 2016, 2018, 2019; Ладыгин, Фролова, 2002, 2006; Ладыгин, 2014]).

Вулкан Безымянный, расположенный в центральной части Ключевской группы вулканов Камчатки (рис. 1), в настоящее время является одним из самых активных в мире. Пробуждение его в октябре 1955 г. после тысячелетнего молчания [Брайцева, Кирьянов, 1982], катастрофическое извержение 30 марта 1956 г. с выносом и перемещением более 3 км³ материала [Горшков, 1957; Горшков, Богоявленская, 1965; Богоявленская, Кирсанов, 1981; Богоявленская и др., 1991] и продолжающийся до настоящего времени рост лавового купола в эксплозивном кратере (например, [Кирсанов и др., 1971; Кирсанов, 1979; Алидибиров и др., 1988; Гирина и др., 2020, 2022; Girina, 2013; Girina et al., 2020; Ozerov et al., 2020]), привлекают внимание к вулкану многочисленных исследователей.

Вулкан Безымянный отличается достаточно длительным периодом становления: Пра-Безы-

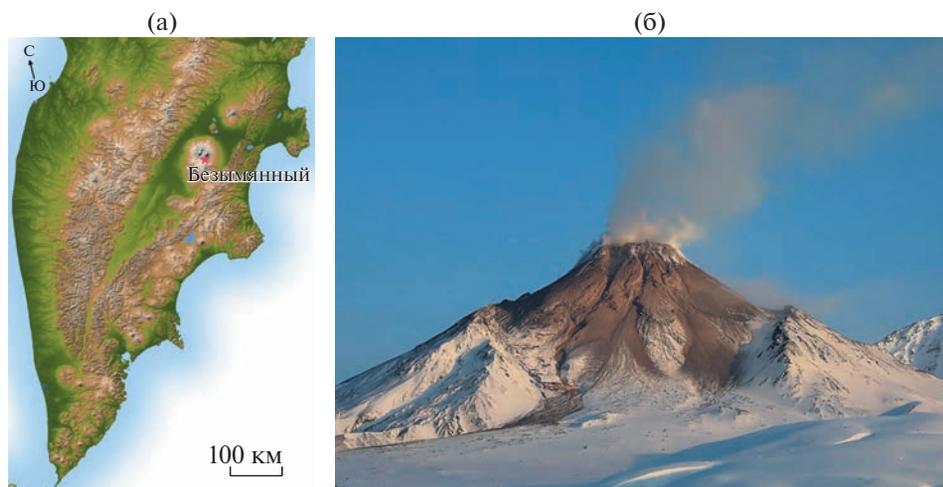


Рис. 1. Вулкан Безымянный: расположение на полуострове Камчатка (а) и вид с юго-востока, фото Ю.В. Демянчука 20 апреля 2022 г. (б).

мянный — 10–11 тыс. лет; собственно Безымянный — более 5.5 тыс. лет [Брайцева, Кириянов, 1982; Брайцева и др., 1990; Богоявленская и др., 1991; Braitseva et al., 1995], во время которого сформировались различные фации магматических образований: экструзивные куполы, лавовые и пирокластические потоки. Состав их достаточно разнообразен — от дацитов до андезибазальтов, с различными порфиоровыми вкрапленниками (плагноклаз, ромбический и моноклинный пироксены, роговая обманка, титаномagnetит, magnetит), разнообразными структурами основной массы (гиалопилитовая, интерсертальная, микролитовая и др.). В целом, все три фации вулкана развиваются синхронно и перемежаются друг с другом в пределах вулканической постройки и прилегающих территорий. При сравнении химического и минерального состава пород лавовых потоков и экструзивных куполов существенных различий не отмечается [Борисов, Борисова, 1974; Ладыгин и др., 2019]. Возможно, это связано с тем, что источником для них был единый магматический очаг, но условия выхода на поверхность лавы, длительность ее кристаллизации (то есть различные термодинамические и флюидные условия, при которых происходило остывание и кристаллизация расплава) обусловили различный структурно-текстурный облик породы, что привело к значительным различиям петрофизических свойств пород этих фаций.

Распространение образований трех фаций в районе вулкана неравномерно. Лавовые потоки располагаются на всех склонах постройки вулкана, а также бронируют купол Новый, выросший в экструзивном кратере 1956 г. Экструзии сосредоточены в центральной и южной частях постройки вулкана, а также у его южного подножия. Их возраст варьируется в широких пределах: от более 11000 до 40 лет (купол Новый). Пирокластические

потоки, сформировавшиеся с 1956 г. до настоящего времени, в основном сосредоточены в долинах Восточная и Южная на юго-восточном склоне вулкана, но небольшое их количество отмечается на всех склонах и подножиях вулкана: во время эксплозивных извержений с подъемом вертикальных эруптивных колонн до 15 км над уровнем моря пирокластика обрушивалась на все склоны и подножия вулкана.

Петрофизические свойства лавовых потоков Безымянного детально описаны нами в статье [Ладыгин и др., 2012], настоящая работа посвящена характеристике его экструзивных образований.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Авторами статьи исследованы и опробованы 13 экструзивных куполов (рис. 2). Всего было отобрано 115 образцов, которые охватывали весь диапазон пород каждого из куполов, различающихся, в первую очередь, по величине плотности, т.к. она оказывает главное влияние на большинство петрофизических свойств, а также прочностные и деформационные характеристики.

Из каждого образца было подготовлено от 2 до 5 проб правильной геометрической формы в виде прямоугольных призм или цилиндров ($h = d \sim 3-4$ см) для лабораторного изучения. Определялись или вычислялись следующие показатели петрофизических и прочностных свойств пород: плотность (ρ , г/см³), плотность твердой компоненты (минеральная плотность) (ρ_s , г/см³), общая пористость (n , %), величина водопоглощения (W , %), магнитная восприимчивость ($\chi \times 10^{-3}$ ед. СИ) (каппаметр КТ-6), скорость распространения продольных волн в сухом (V_p , км/с) и в водонасыщенном ($V_{pв}$, км/с) состояниях (метод ультразву-

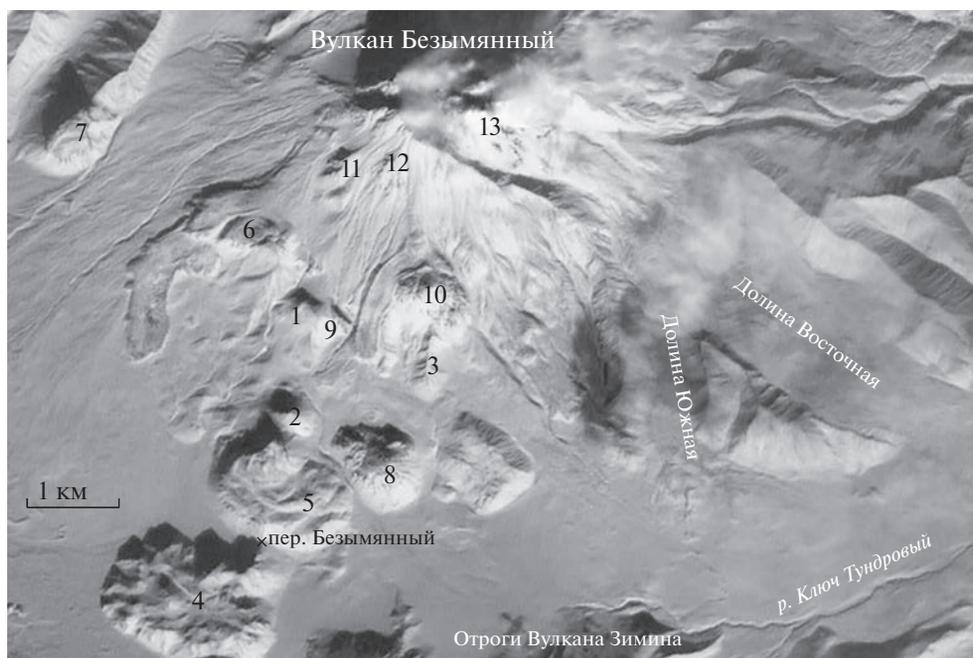


Рис. 2. Экструзивные куполы в районе вулкана Безымянный на спутниковом снимке Aster от 24 февраля 2005 г. 1 – Гладкий, 2 – Правильный, 3 – Пестрые хребтики, 4 – Плотина, 5 – Ступенчатый, 6 – Двуглавый, 7 – Кулич, 8 – Экспедиция, 9 – Побочный, 10 – Лохматый, 11 – Погребенный, 12 – Высокий, 13 – Новый.

кового просвечивания, приборы ИПА-59, “Ультразвук”), прочность при одноосном сжатии в сухом ($R_{сж}$, МПа) и в водонасыщенном ($R_{сж в}$, МПа) состояниях и растяжении (R_p , МПа) (механические прессы ZDM-10, ПСУ-125). Все определения проводились по стандартным методикам, подробное описание которых приведено в работах [Фролова, 2015, Лабораторные ..., 2017].

Одновременно с определением свойств изучались структурно-минералогические особенности пород. Для всех образцов лав проведено описание шлифов с использованием оптических микроскопов “ПОЛАМ Л-213М” и “Olympus VX-41”.

ЭКСТРУЗИВНЫЕ ОБРАЗОВАНИЯ ВУЛКАНА БЕЗЫМЯННЫЙ

В южной части вулкана Безымянный разными авторами насчитывается до 17 экструзивных куполов [Богоявленская, 1957, 1960; Горшков, Богоявленская, 1965; Ермаков, 1977; Брайцева и др., 1990; Almeev et al., 2013]. Наиболее выраженным образованием является цепочка из четырех слившихся экструзивных куполов, перегораживающих стыкующиеся долины рек Ключ Тундровый и Студеная, под общим названием Плотина, которое дал ей С.А. Конради в 1909 г. [1911]. В дальнейшем это название закрепилось за тремя экструзивными к югу от перевала Безымянный. Экструзивная к северу от Плотины получила название Седло, но затем часть его была названа куполом

Ступенчатый, а другая часть – куполом Правильный [Горшков, Богоявленская, 1965]. Исследователи по разному оценивали возраст и принадлежность экструзивных куполов вулкану Безымянный, но были единодушны в утверждении, что экструзивные куполы являются одними из наиболее древних в этом районе [Заварицкий, 1955; Пийп, 1956; Богоявленская, 1957, 1960; Ермаков, 1977]. Эту экструзивную купол считали как самостоятельной, выжатой по трещине между вулканами Безымянный и Зимина [Конради, 1911; Тимербаева, 1967; Ермаков, 1977], так и латеральной, принадлежащей Безымянному [Пийп, 1956; Горшков, Богоявленская, 1965].

Согласно тефрохронологическим данным [Брайцева и др., 1990], наиболее древними (вторая половина верхнего плейстоцена) являются экструзивные куполы Гладкий, Правильный и Пестрые хребтики (Расчлененный), сложенные дацитами. Несколько позднее, во время II фазы оледенения, образовались при подледных излияниях куполы типа тьюя: Плотина, Ступенчатый, Двуглавый и Кулич, состав которых соответствует роговообманковому и пироксеновому андезитами. Все они сформировались ранее вулкана Правильный (ранее 11000 лет назад). В промежутке 3300–5500 лет назад одновременно с формированием стратовулкана Безымянный росли экструзивные куполы Экспедиция и Побочный. Купол Лохматый образовался в промежутке 1000–1350 лет назад. Кроме указанных, существу-

ют недатированные куполы: Высокий и Погребенный, расположенные в верхней части современного стратовулкана Безымянный. Самый молодой купол Новый формируется в кратере вулкана с апреля 1956 г. до настоящего времени [Горшков, Богоявленская, 1965; Брайцева и др., 1990; Гирина и др., 2022; Girina, 2013].

Среди экструзий В.А. Ермаков [1977] считает наиболее древним южный купол Плотины, названный им Кулиса. Он выделяет однофазные (Кулиса, Кулич) и двухфазные (Ступенчатый, Двуглавый) куполы. У последних первичная столбовидная поверхность обычно деформирована последующим внедрением более вязких и более кислых обелисков. Типичным обелиском подобного рода по его представлениям является купол Правильный, к обелиску также относится трещинный купол Побочный, структурно связанный с куполом Двуглавый. Он считает также, что латеральными экструзиями являются наиболее молодые куполы, образовавшиеся одновременно с Безымянным: Экспедиция, Лохматый, Погребенный и Высокий.

При разделении экструзий на группы, разные авторы использовали различные принципы. Г.Е. Богоявленская [1957] выделила три группы куполов, используя различия слагающих их пород, например: Гладкий и Правильный сложены дацитами; Лохматый, Экспедиция и Побочный – роговообманковыми андезитами с большим количеством гомеогенных включений самых разных размеров; Двуглавый и Ступенчатый – пироксеновыми андезитами. А.Ю. Озеров с соавторами [1997] разделили их на две группы по возрасту: до образования вулкана Безымянный (15–20 тыс. лет назад) и появившихся синхронно с его формированием (5–5.5 тыс. лет назад). В первую группу вошли куполы Гладкий, Правильный, Пестрые хребтики, Плотина, Ступенчатый, Двуглавый, Разлатый, Кулич, во вторую группу – Лохматый, Экспедиция, Треугольный зуб, Экструзивный гребень (Погребенный).

В этой работе мы рассматриваем особенности пород экструзивных куполов, разделив их на четыре группы. Первые три группы объединяют куполы по возрасту согласно работе [Брайцева и др., 1990]. В четвертую группу мы включили куполы, расположенные на постройке стратовулкана Безымянный (Лохматый, Высокий, Погребенный) и внутри него (купол Новый). Краткое описание морфологии куполов дано по работам [Богоявленская, 1957, 1960; Горшков, Богоявленская, 1965; Ермаков, 1977; Кирсанов, 1979]. Петрографическое описание пород выполнено авторами статьи.

К первой группе относятся наиболее древние куполы Гладкий, Правильный и Пестрые хребтики, образовавшиеся до появления вулкана Пра-

Безымянный (ранее 11 тыс. лет назад) [Брайцева и др., 1990].

Куполы Гладкий и Правильный – конусообразные холмы вязкой лавы, сильно сглаженные эрозией, находятся на высоте 1650 м. Вершины их сложены россыпью глыб с характерной тонкой плитчатой отдельностью толщиной от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров. Лавы светло-серого и светло-розового цвета, плотные, по составу относятся к роговообманковым дацитам. Среднее содержание SiO_2 составляет для купола Гладкий 64.63% (3 образца), для купола Правильный 65.46% (5 образцов) [Брайцева и др., 1990; Almeev et al., 2013]. Лавы имеют пористую текстуру, порфиновую структуру с интерсертальной структурой основной массы. На Правильном очень редко наблюдались также лавы с гиалопилитово-интерсертальной и гиалопилитовой структурой основной массы. Породы купола Правильный содержит порядка 40–60% порфиновых вкрапленников, лавы Гладкого – до 20–35%. По составу вкрапленники представлены плагиоклазом и роговой обманкой, иногда в лавах Правильного отмечается только плагиоклаз. Основная масса пород состоит из вулканического стекла и минералов плагиоклаза, роговой обманки и титаномагнетита; в некоторых образцах роговая обманка не отмечается. Для Гладкого из рудных минералов характерен титаномагнетит (до 10%), для Правильного, кроме него, также ильменит и магнетит (до 10%).

Купол Пестрые хребтики (Расчлененный) находится у южного подножия постройки вулкана Безымянный, он частично перекрыт породами купола Лохматый. Лавы купола по составу относятся к дацитам. Среднее содержание SiO_2 составляет 67.28% (9 образцов) [Брайцева и др., 1990; Almeev et al., 2013]. Текстура породы пористая, структура лавы – порфировая, основной массы – интерсертальная. Количество вкрапленников в лавах составляет в среднем 10%. Состав вкрапленников представлен преимущественно роговой обманкой и плагиоклазом, крайне редко – только плагиоклазом. Изредка отмечается замещение роговой обманки магнетитом. Основная масса лав состоит из стекла, плагиоклаза и рудных минералов, встречается роговая обманка. Рудные минералы представлены титаномагнетитом (~3–5%) и магнетитом, в присутствии последнего содержание рудных минералов возрастает до 10%.

Ко второй группе относятся куполы моложе древних (типа туюя): Плотина, Ступенчатый, Двуглавый и Кулич [Брайцева и др., 1990].

Купол Плотина состоит из трех слившихся вместе крупных экструзивных куполов, вытянутых в широтном направлении. Нижние части склонов купола примерно на две трети покрыты осыпью, выше обнажается монолитная экструзивная лава с вертикальной столбчатой отдель-

стью, местами переходящей в крупноглыбовую. Западный склон купола ограничен субвертикальными дайками со столбчатой отдельностью пород. Лавы купола представлены темно-серым рогообманковым и пироксеновым андезитом. Среднее содержание SiO_2 составляет 56.84% (15 образцов) [Ермаков, 1977; Almeev et al., 2013].

Текстура пород купола Плотина пористая, структура лавы – порфировая, основной массы – интерсертально-гиалопилитовая, изредка интерсертально-долеритовая, интерсертальная и гиалопилитовая. Количество вкрапленников в породах варьируется от 1 до 70% (в среднем 30–40%). Состав вкрапленников в разных образцах лав представлен роговой обманкой и плагиоклазом; пироксеном и плагиоклазом; редко роговой обманкой, пироксеном и плагиоклазом; иногда только плагиоклазом; или только пироксеном. К ассоциации основной массы (стекло, плагиоклаз, роговая обманка, титаномагнетит) порой добавляется пироксен, или он присутствует вместо роговой обманки. Содержание титаномагнетита варьируется от 1 до 10% (в среднем 6%), редко встречается магнетит.

Купол Ступенчатый расположен на южном склоне вулкана на высоте 1450–1500 м. Относительная высота купола 250 м. Ступенчатый имеет обрывистую высокую стенку северного склона, увенчанного монолитом. От монолита на юг ярусами, окаймляя вершину, спускаются лавовые языки, но никаких следов первичной полосчатости или структур течения лав не отмечается. Купол сложен темно-серыми дупироксеновыми андезитами. Среднее содержание SiO_2 составляет 57.47% (6 образцов) [Брайцева и др., 1990; Almeev et al., 2013]. Породы представляют собой плотные лавы с вкрапленниками плагиоклаза, пироксена и роговой обманки (до 27%). Структура породы серийно-порфировая, редко афировая; с гиалопилит-интерсертальной, иногда долеритовой, интерсертально-долеритовой или интерсертальной структурами основной массы. Во вкрапленниках – плагиоклаз размером до 1.5–2 мм; пироксен моноклинный (редкие одиночные кристаллы размером до 0.1–0.5 мм) и ромбический (размером до 0.2–0.3 мм, с содержанием FeSiO_3 от 30 до 35%); титаномагнетит (до 20%); очень редко роговая обманка размером до 1–1.5 мм. Основная масса лав состоит из стекла, плагиоклаза и пироксена, изредка роговой обманки и титаномагнетита.

Купол Двуглавый расположен на юго-западном склоне вулкана на высоте 1700 м. Купол вытянут в широтном направлении, в плане он имеет форму эллипса, суживающегося в своей западной части. Относительная высота его 250 м. Северный склон Двуглавого разрушен эрозией и постепенно переходит в склон вулкана, остальные его склоны крутые. Вершина купола состоит из двух

холмов, разделенных небольшой впадиной. Его южный и восточный склоны хорошо обнажены, на вершине и на других его склонах лава в коренном залегании встречается лишь в двух-трех обнажениях. Структура течения лавы выражена слабо. Слоистость подчеркивается плитчатой отдельностью: она тонкая, толщиной от нескольких миллиметров до 4–5 см. Купол сложен преимущественно темно-серыми плотными пироксеновыми андезитами. Среднее содержание SiO_2 составляет 60.56% (3 образца) [Брайцева и др., 1990; Almeev et al., 2013]. Структура породы в основном афировая, редко порфировая: наблюдаются вкрапленники плагиоклаза (размером не более 0.2–0.3 см) с небольшим количеством пироксена; только плагиоклаза, изредка встречаются мелкие кристаллы роговой обманки. Структура основной массы – интерсертальная. Состав основной массы лав представлен стеклом, плагиоклазом, пироксеном, рудными минералами и иногда роговой обманкой в дополнение к этой ассоциации или вместо пироксена. Титаномагнетита содержится 1–2%, но в разностях, где появляется магнетит, содержание рудных минералов достигает ~10%.

Купол Кулич находится на отроге вулкана Камень у западного подножия вулкана Безымянный. Породы купола – преимущественно рогово-обманковые андезиты с долей пироксеновых. Содержание SiO_2 составляет 57.86% [Брайцева и др., 1990]. Текстуры пород пористые, структуры порфировые с интерсертальной и редко интерсертально-долеритовой структурой основной массы. Количество вкрапленников варьируется от 5 до 70%, вкрапленники представлены плагиоклазом, роговой обманкой, пироксеном и рудными минералами (титаномагнетитом и магнетитом в концентрации от 0 до 30%, в среднем 10%).

К третьей группе относятся куполы Экспедиция и Побочный возрастом 3300–5500 лет [Брайцева и др., 1990]. Они имеют холмистые, увенчанные монолитами, обелисками и остроконечными гребнями вершины и крутые склоны, большая часть которых покрыта осыпями глыб всевозможных размеров, представляющих собой агломератовые мантии куполов. Лавы представлены роговообманковыми андезитами. Во вкрапленниках преобладает угольно-черная роговая обманка со стеклянными блеском, образующая вытянутые кристаллы размером от долей миллиметров до 2 см; также содержатся вкрапленники плагиоклаза размером до 0.5 см.

Купол Экспедиция расположен на южном склоне вулкана, на высоте 1450 м. Относительная высота его 280 м. Купол вытянут в широтном направлении, вершина его увенчана монолитными глыбами, обелисками, остроконечными гребнями, склоны большей частью покрыты осыпями.

Купол сложен серыми роговообманковыми андезитами, насыщенными гомеогенными включениями. Среднее содержание SiO_2 составляет 61.05% (3 образца) [Брайцева и др., 1990; Almeev et al., 2013]. Текстура пород экструзии пористая, структура порфировая, структуры основной массы лав – гиалопилитовая и интерсертальная. Количество вкрапленников в породах варьируется от 5 до 80% (в среднем 25–30%). Вкрапленники представлены преимущественно роговой обманкой и плагиоклазом, иногда к ним добавляется пироксен или он присутствует вместо роговой обманки. К основной массе породы (стекло, плагиоклаз, роговая обманка, титаномагнетит) также изредка добавляется пироксен или он существует вместо роговой обманки. Содержание титаномагнетита варьируется от 3 до 8% (в среднем 5%).

Размер гомеогенных включений в обелисках нижних частей купола достигает 20 см, очень редко 40 см, средний их размер 2–5 см, частота встречаемости: 5–6 включений на 1 м². Включения имеют овальную форму, как правило, сложены теми же минералами, что и вмещающие их породы, но содержат большее количество роговой обманки и других темноцветных минералов, что делает их более основными по химическому составу. На вершине купола гомеогенные включения в лавах не отмечаются [Горшков, Богоявленская, 1965].

Купол Побочный на высоте 1800 м представляет собой вытянутый в широтном направлении треугольный холм вязкой лавы с вершиной, увенчанной обелисками и монолитами. Породы купола сложены серыми роговообманковыми андезитами, их особенностью является полосчатость, выраженная в чередовании серого и розового андезита одинакового состава, ширина полос варьируется от 1.5 до 5 см. Содержание SiO_2 составляет 61.49% [Горшков, Богоявленская, 1965]. Текстура пород экструзии пористая, структура порфировая, структура основной массы – гиалопилитовая, редко интерсертальная. Во вкрапленниках отмечаются роговая обманка и плагиоклаз (от 5 до 35%). Состав основной массы лав представлен стеклом, плагиоклазом, роговой обманкой, рудными минералами (магнетит и титаномагнетит до 3–10%), изредка роговой обманки не отмечается.

К четвертой группе относятся самые молодые куполы, связанные с ростом вулкана Безымянный (расположены внутри и на его постройке): Лохматый, Погребенный, Высокий и Новый.

Купол Лохматый находится на южном склоне вулкана на высоте 1800 м. Относительная его высота – 250 м, возраст – 1000–1350 лет [Брайцева и др., 1990]. По морфологии и петрографическому составу пород он близок куполу Экспедиция. Лохматый сложен серыми роговообманковыми андезитами, содержащими большое ко-

личество гомеогенных включений. Среднее содержание SiO_2 составляет 62.19% (7 образцов) [Брайцева и др., 1990; Иванов, 2008; Almeev et al., 2013]. Структура породы порфировая, иногда афировая; с интерсертальной, очень редко гиалопилит-интерсертальной структурой основной массы. Количество вкрапленников в разных образцах лавы варьируется от 15 до 50%, составляя в среднем 30%. Вкрапленники представлены роговой обманкой и плагиоклазом, в составе основной массы лав отмечаются стекло, плагиоклаз, роговая обманка, рудные минералы (магнетит и титаномагнетит содержанием от 1 до 50%).

Купол Погребенный (Экструзивный гребень) расположен в средней части постройки вулкана на его западно–юго-западном склоне. Породы купола – преимущественно пироксеновые андезиты. Среднее содержание SiO_2 составляет 60.83% (2 образца) [Брайцева и др., 1990; Almeev et al., 2013]. Текстура пород пористая, структура лавы порфиробластовая, а основной массы – гиалопилитовая. Количество вкрапленников ~55%, они представлены пироксеном и плагиоклазом, иногда в ассоциации с роговой обманкой. В основной массе лав содержится стекло, плагиоклаз, пироксен (изредка пироксен отсутствует), рудные минералы (преимущественно титаномагнетит, но иногда с магнетитом, содержание их <5%).

Купол Высокий находится восточнее и гипсометрически немного выше Погребенного. Сложен купол роговообманковыми андезитами. Содержание SiO_2 составляет 63.22% [Иванов, 2008]. Текстура лав пористая, структура породы порфировая, изредка афировая; структура основной массы – гиалопилитовая и интерсертальная. Количество вкрапленников варьируется от 1% до 30%, они представлены плагиоклазом и роговой обманкой. В основной массе лав содержится стекло, плагиоклаз, роговая обманка и рудные минералы, представленные в основном магнетитом, изредка также титаномагнетитом (до 3%).

Купол Новый формируется в эксплозивном кратере, образовавшемся в постройке вулкана Безымянный во время катастрофического извержения 30 марта 1956 г. Породы купола – преимущественно пироксеновые андезиты с долей роговообманковых, содержащие гомеогенные включения. Среднее содержание SiO_2 составляет 59.01% (10 образцов) [Горшков, Богоявленская, 1965; Брайцева и др., 1990; Иванов, 2008]. Текстура лав пористая, структура порфировая, структура основной массы – гиалопилитовая. Вкрапленники в лавах представлены в основном пироксеном и плагиоклазом, иногда роговой обманкой. Их количество меняется от 20 до 70% (в среднем 50%). Основная масса лав состоит из стекла, плагиоклаза, пироксена и рудных минералов, редко с примесью роговой обманки. Рудные минералы представлены

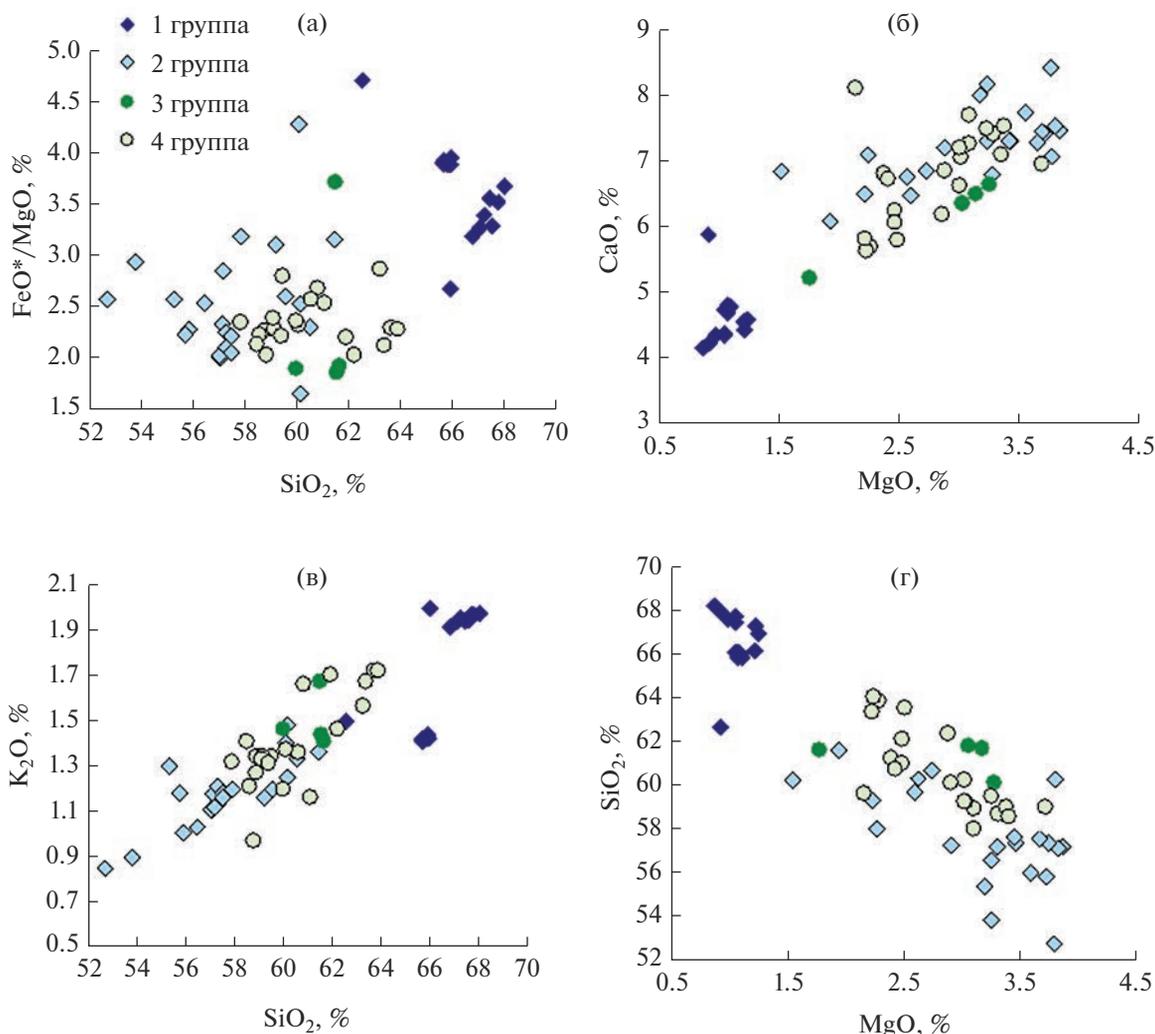


Рис. 3. Вариации химического состава пород экструзий вулкана Безымянный (с использованием материалов [Горшков, Богоявленская, 1965; Ермаков, 1977; Брайцева и др., 1990; Иванов, 2008; Almeev et al., 2013]). Содержание петрогенных оксидов пересчитаны на безводную основу.

титаномагнетитом и магнетитом, общее их содержание варьируется от 5 до 30%.

ПЕТРОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОРОД ЭКСТРУЗИЙ

По химическому составу лавы всех куполов относятся к породам умеренной щелочности. Содержание в них кремнекислоты варьируется от 52.67 (Плотина) до 68.03% (Пестрые хребтики), тогда как в породах, например, купола Новый диапазон ее изменения достаточно узок: от 57.85 до 60.11% (рис. 3).

Дацитовые лавы самых древних куполов содержат наименьшее количество оксида магния (от 0.87 до 1.24%) и суммарного (FeO + Fe₂O₃) оксида железа (от 3.19 до 4.33%). Наибольшие количества оксида магния и оксида железа отмечаются в

породах куполов Плотина (3.85 и 9.71% соответственно) и Ступенчатый (3.65 и 8.25% соответственно), что обусловлено повышенным содержанием в их составе темноцветных и рудных минералов. Зависимости содержаний MgO–CaO, MgO–SiO₂ и SiO₂–K₂O наиболее четко выражены для лав более молодых куполов (3 и 4 группы) (см. рис. 3).

Текстуры всех лав рассматриваемых нами экструзий вулкана Безымянный – пористые. Структуры пород всех экструзий в целом – порфировые, исключение составляют куполы Двуглавый, Ступенчатый и Высокий, которые иногда (Двуглавый и Ступенчатый преимущественно) имеют также афировые структуры. Структуры основной массы пород различны не только у разных куполов, но и в пределах одной экструзии. Из 13 рассматриваемых экструзий, шесть имеют преимущественно интерсервальную структуру основной мас-

сы лав, четыре – гиалопилитовую, остальные – гиалопилит-интерсертальную. Для пород наиболее древних куполов характерна интерсертальная структура основной массы, в лавах купола Правильный очень редко наблюдается также гиалопилит-интерсертальная и гиалопилитовая. Для куполов типа туйя, расположенных у подножия вулкана, структуры основной массы пород представлены вариациями от гиалопилитовой до интерсертально-долеритовой, со всеми переходными разностями; для пород самых молодых куполов, расположенных внутри постройки и на склонах вулкана – гиалопилитовая, интерсертальная и иногда гиалопилит-интерсертальная и афировая. При сравнении андезитов с гиалопилитовой и интерсертальной структурами значительных различий между ними не выявлено, однако можно отметить тенденцию снижения степени раскристаллизованности (увеличения количества стекла) основной массы пород от древних к более молодым экструзиям.

По составу вкрапленников отмечается следующая закономерность: породы древних куполов (первая группа) в качестве вкрапленников содержат плагиоклаз и роговую обманку, в лавах менее древних куполов (вторая группа) она присутствует также, но не постоянно, вместо нее или в ассоциации с ней появляется пироксен. Например, в породах куполов Двуглавый и Ступенчатый (вторая группа) чаще присутствует пироксен, но иногда и роговая обманка, однако нередко наблюдаются и афировые структуры пород. Лавы Плотины и Экспедиции имеют смешанный состав вкрапленников, но чаще это все-таки плагиоклаз и роговая обманка, иногда с пироксеном; изредка в качестве вкрапленников содержится только плагиоклаз или только пироксен. Вкрапленники лав купола Новый представлены преимущественно плагиоклазом и пироксеном, но отмечается и роговая обманка.

Рудных минералов в лавах древних экструзий содержится ~5–10%, представлены они титаномагнетитом; в породах средневозрастных экструзий их 3–6% (также титаномагнетит), иногда до 20% (в разностях, где появляется магнетит). В лавах молодых экструзий титаномагнетита содержится первые проценты, но в разностях, где появляется магнетит, содержание рудных минералов иногда достигает 30%. В некотором приближении можно отметить снижение содержания в лавах титаномагнетита и увеличение концентрации магнетита от более древних к молодым куполам.

Что касается минерального набора основной массы пород, то в лавах всех куполов неизменно присутствуют вулканическое стекло, плагиоклаз и рудные минералы, которые “разбавляются” роговой обманкой и/или пироксеном в разных соотношениях. Породы первой группы содержат рого-

вую обманку; второй группы – роговую обманку и пироксен в разных комбинациях; третьей – роговую обманку, четвертой – пироксен и редко роговую обманку, иногда без пироксена. По рудным минералам можно отметить слабую тенденцию к накоплению их в матрице породы по мере омоложения экструзивных куполов, потому что в первой группе пород их содержание колеблется от 2 до 10%, во второй от 0 до 30%, в третьей – от 3 до 10%, в четвертой – до 30%.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что породы экструзий в основном различаются по составу и количеству порфировых вкрапленников и концентрациям магнетита и титаномагнетита.

ПЕТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ПОРОД ЭКСТРУЗИВНЫХ КУПОЛОВ

Для пород, слагающих экструзивные куполы вулкана Безымянный, характерен широкий разброс значений петрофизических свойств в зависимости от пористости и структурно-минералогических особенностей. Если анализировать средние значения показателей свойств, то породы являются плотными ($\rho = 2.22 \text{ г/см}^3$; 114 образцов), среднепористыми ($n = 19\%$; 47 образцов); прочными ($R_{сж\ c} = 84 \text{ МПа}$, $R_{сж\ в} = 69 \text{ МПа}$; 114 и 77 образцов соответственно). При этом для них характерны относительно невысокие значения скоростей распространения упругих волн ($V_p = 2.79 \text{ км/с}$, $V_{p\ в} = 3.58 \text{ км/с}$; 113 и 98 образцов соответственно) (табл. 1).

Изменение плотности отмечается в пределах от 1.74 до 2.47 г/см³ для андезитов с интерсертальной структурой (куполы Экспедиция и Плотина соответственно), и от 1.74 до 2.68 г/см³ – с гиалопилитовой (куполы Побочный и Плотина соответственно).

Пористость лав изменяется от 12.7% для андезитов с гиалопилитовой структурой (купол Новый) и до 28.5% для лав с долеритовой структурой (купол Ступенчатый). В целом, с увеличением пористости, плотность пород закономерно снижается.

Величина водопоглощения варьируется от 1.3 до 12.4% для андезитов с интерсертальной структурой (куполы Правильный и Экспедиция соответственно) и от 1.9 до 13% с гиалопилитовой (куполы Новый и Экспедиция соответственно). Отчетливо выражена зависимость водопоглощения от плотности (рис. 4а). С увеличением плотности пород снижается их пористость, соответственно, и водопоглощение.

Скорость продольных волн в андезитах с интерсертальной структурой изменяется в пределах от 1.6 до 4.2 км/с (куполы Лохматый и Правильный соответственно), с гиалопилитовой – от 1.8

Таблица 1. Петрофизические и прочностные свойства экструзивных пород вулкана Безымянный

№ образца	ρ , г/см ³	ρ_s , г/см ³	n , %	W , %	V_p , км/с	V_{pB} , км/с	$R_{сж с}$, МПа	$R_{сж в}$, МПа	R_p , МПа	$\chi \times 10^{-3}$ СИ
Купол Гладкий (роговообманковые дациты)										
Б-10а	2.29	2.76	17	3.1	2.5	3	113	103	9.7	2
Б-10г	2.3	2.76	16.7	4	2.4	3.05	108	97	6.9	7.8
Б-10б	2.2	2.76	20.3	4.7	3.15	3.55	86		10.8	8.8
Б-10в	2.22	2.76	19.6	5.1	2.3	2.85	92		7.3	20.1
Б-10д	2.15	2.76	22.1	5.4	2.45	3.35	87	87	6.5	18
Купол Правильный (роговообманковые дациты)										
Б-5а	2.35	2.76	14.9	1.3	4.2	4.7	179		23	34
Б-5б	2.33	2.76	15.6	2.5	2.6	3.4	130	87	9	20.4
Б-5е	2.32	2.76	15.9	3.3	2.6	3.25	130	130	11.6	13.6
Б-5в	2.22	2.76	19.6	4	2.95	3.45	127		11.5	24.8
Б-5д	2.22	2.76	19.6	4.9	2.3	3.05	94		12.2	5.4
Б-5г	2.29	2.76	17	4.1	2.55	3.2	115	115	9	0.7
Б-5а	2.35	2.76	14.9	1.3	4.2	4.7	179		23	34
Купол Пестрые хребтики (дациты)										
б ж	2.26	2.76	18.1	4	2.6	2.7	66	48		20.4
Б-20а	2.28	2.68	14.9	4.2	2.4	3	101	81	6.6	23.8
Б-20б	2.23	2.72	18	4	2.4	2.9	92	47	4.8	13.6
Б-20г	2.32	2.72	14.7	2.7	2.65	3.4	122	105	12	26.9
Б-20в	2.4	2.72	11.8	2.1	3.8	4.1	139	125		28.9
Б-20ж	2.27	2.72	16.5	4.6	2.75	2.95	100	93	7.1	27.2
Б-20д	2.26	2.72	16.9	3.2	2.75	3.3	122	66	12	1.7
Б-20з	2.32	2.72	14.7	3.7	2.75	2.75	98		6.3	3.1
Б-20е	2.34	2.72	14	3.2	2.5	2.9	108	108	6.9	3.1
Купол Плотина (роговообманковые и пироксеновые андезиты)										
Б-37а	1.94			9.6	3.1	3.25	22		3.3	28.2
Б-37б	2.2			5.4	3.35	3.75	52	48		30.6
Б-37б	2.03			8.2	3.15	3.35	45	30		
Б-37в	2.28			4.8	2.3	3.5	100	87		41.8
Б-37г	2.31			4.6	3.1	3.5	72		7.3	37.4
Б-37д	2.34			4.1	3.6	3.85	68	68		40.8
Б-37к	2.09			8.1	3.7	4.05	61	26		20.4
Б-37н	2.32			4	3.45	3.9	91	84		45.2
Б-37п	2.41			3.1	3.3	4.05	115	105	9.5	19.4
Б-37р	2.45				4.15		103			11.6
Б-37г	2.27			3.5	3.55	3.95	50	37		38.4
Б-37ю	2.37			2.8	3.2	4.1	93	72	8.2	40.5
Б-37л	2.28			4	3.6	4.25	72	50		31.3
Б-37м	2.28			3.9	3.6	4.3	89	44	8.5	31.6
Б-37с	2.34			2.1	3.75	4.25	64		6.8	45.2
Б-37з	2.68			0.6	4.05	5.3	238			19
Б-37и	2.36			3.1	2.75	4.2	79	70	3.4	45.2
Б-37о	2.29				3.4		79			36
Б-37ч	2.47				3.2		76			
Б-37у	2.46			1.9	3.05	4.2	133		8	40.5
Б-37ф	2.42			2.1	3.4	4.4	142	123	9.6	34
Б-37х	2.47				3.2		76			

Таблица 1. Продолжение

№ образца	ρ , г/см ³	ρ_s , г/см ³	n , %	W , %	V_p , км/с	V_{pB} , км/с	$R_{сжс}$, МПа	$R_{сжв}$, МПа	R_p , МПа	$\chi \times 10^{-3}$ СИ
Купол Двуглавый (пироксеновые андезиты)										
Б-26а	2.32		14.1	2.9	2.75	3.7	102	102	11.2	20.4
Б-26в	2.31		14.4	3	3.5	3.8	117	97	10.6	8.2
Б-26б	2.36		12.6		3.5		140		12.6	31.6
Б-26г	2.33		13.7		3.4		142		16.9	16
Б-26д	2.25	2.7	16.7	4.2	3.05	3.6	100		12.1	17
Б-26е	2.17		19.6		3.4		84			13.9
Купол Ступенчатый (дупироксеновые андезиты)										
Б-3а	2.24			4.4	3.1	4.15	99	85	8.9	27
Б-3б	2.19			5	3	4	89	56	8.3	22.8
Б-3в	1.99			11.7	2.7	3.7	59	58	6	24.8
Б-3г	2.01	2.81	28.5	9.1	2.9	3.85	45	32	4.4	21.1
Б-3д	1.86			13.1	3.7	3.9	33	21	4.9	22.8
Б-3л	2.19			4.6	3.85	4.4	99	70	10.3	27.2
Б-3м	2.2			6.9	3.7	4.15	61	58	8.7	24.8
Б-3е	2.29			2.4	3.35	4.35	100		9.5	27.2
Б-3з	1.85			15.9	2.85	3.25	38	26	3.9	22.8
Б-3и	2.14			5	3.35	4.1	60		8	22.8
Б-3к	2.2			6.7	3.6	4.25	64	59	9.9	24.8
Б-3ж	2.22			4.1	3.5	4.2	101	90	5	18.4
Б-3н	2.03			9.9	3.35	3.75	42	27	6.8	27.2
Б-3о	2.21			6.9	3	3.95	77	73	6.5	26.2
Б-3р	2.2			5.3	3	4.05	74	55	5.3	29.6
Купол Кулич (роговообманковые андезиты с долей пироксеновых)										
Б-8а	2.75			1	2.8	4.1	202	213	17	18
1а	2.37			2.8	3.1	3.5	107	65	7.3	37.8
1б	2.21			5.2	2.5	3	74			19.4
1в	2.26			4.7	2.4	3	65	51	17	17.7
Б-8б	2.39			2.9	2.8	3.4	102	93	10	58.8
Б-8в	2.49			1.6	3.1	4.1	117	124	12	24.8
Б-8г	2.49			0.8	3.8	4.7	184	178	15	54.1
Б-8д	2.15			5.7	2.8	3.6	69	62	10	18
Купол Экспедиция (роговообманковые андезиты)										
5а	1.91		29	9.5	2.35	3.2	35	35	2.3	3.4
5б	2.24		16.7	7.5	1.7	2.45	67	54	3.8	34
Б-4а	1.95		27.5	8	2.3	3.35	46	38	4.3	30.6
Б-4г	2.15	2.69	20.1	4	2.35	3.6	87	80		6.8
Б-4г	2.05	2.69	23.8	7	2.15	3.5	45			6.8
Б-4д	2.45	2.75	10.9	2.8	1.7	2.9	126	90	6.6	23.8
Б-4д	1.77	2.75	35.6	13	2.1	3.1	22	15	3.3	
Б-4ж	1.92		28.6	8.7	1.95	3.4	36	29		30.6
Б-4б	1.74		35.3	12.4	2.25	2.75	19	12		27.2
Б-4В	2.17		19.3		3.1		84		7.5	23.8
Б-4е	2.48		7.8	2.3	2.2	3	100	75		27.2
Б-4з	2.16		19.7	4.7	2.7	3.75	63	50	5.5	13.6
Купол Побочный (роговообманковые андезиты)										
бз	2.32			5	2.5	3.1	123	92	7.8	29.6
би	1.97			6.9	2.55	3.8	80	45	6.6	24.5
бк	2.3			4.4	1.4		60	49		9.5
Б-12а	1.94			6.7	3.6	4.3	73	69	8.3	27.2
Б-12в	1.83			10.5	2.5	3.7	41	26		7.8
Б-12в	1.74			11.1	2.45	3.7	23		5.5	
Б-12б	1.85			9.8	3.3	3.95	49	29	4.2	24.5

Таблица 1. Окончание

№ образца	ρ , г/см ³	ρ_s , г/см ³	n , %	W , %	V_p , км/с	V_{pB} , км/с	$R_{сж с}$, МПа	$R_{сж в}$, МПа	R_p , МПа	$\chi \times 10^{-3}$ СИ
Купол Лохматый (роговообманковые андезиты)										
6-д	2.07			6.9	1.7		45	19	3.6	5.8
6-е	1.97			7.6	1.6		39		3.3	11.9
Б-21г	2.17			2.9	2.55	3.7	68	57	3.6	10.9
Б-21д	1.97			6.2	2	2.85	38	28	2.1	8.5
Б-21в	2.02	2.61	22.6	5.7	2.4	3.7	40		3.1	19
6г	1.94	2.82	31.2	10.2	2	2.8	29			30.6
Б-21а	2.28	2.63	13.3	2.4	2.8	4.3	100		6.6	37.4
Б-21б	1.89			8.2	2.05	2.65	40	25	4.4	22.8
Купол Погребенный (пироксеновые андезиты)										
Б-24а	2.3				1.95		50			38.4
Б-24а	2.23				1.9		40		3.2	38.4
Б-24г	2.19				2.05	2.45	43	43	3.5	35.4
Б-24б	2.37				2.5		105			34
Б-24б	2.32						47			34
Б-24в	2.25			2.7	2.6	4.25	84	37	4.9	29.6
Купол Высокий (роговообманковые андезиты)										
Б-23е	2.31			3.7	3.2	4.05	110	100	7.1	36
Б-23д	2.27	2.66	14.7	3.5	2.1	2.6	77	77	4.5	5.4
Б-23ж	1.68	2.66	36.8		2.05		10			22.8
Купол Новый (пироксеновые андезиты с долей роговообманковых)										
831011-12	2.4	2.75	12.7	2.3	1.8	2.4	102	100		29.2
831011-12	2.37			2.8	1.8	3.25	100		7	35.7
831011-13	2.41	2.76	12.7	1.9	2.15	3.3	77	72		7.1
Б-38б	2.36			3.3	1.8	3.4	79			6.8
Б-38б	2.26			4.7	1.65	2.55	60	51		6.8
Б-38а	2.48			2.5	1.95	3.4	111	83		17

Примечание. Названия и обозначения показателей свойств пород приведены в тексте статьи.

до 4.0 км/с (куполы Новый и Плотина соответственно). Нужно отметить, что величины этого параметра для андезитов являются небольшими. Зависимость скорости продольных волн пород от их плотности выражена слабо, однако следует отметить преимущественно более высокие значения V_p для лав более древних куполов по сравнению с молодыми (см. рис. 4б).

Прочность при одноосном сжатии пород варьируется от 29 до 179 МПа для андезитов с интерсертальной структурой (куполы Лохматый и Правильный соответственно) и от 22 до 238 МПа с гиалопилитовой (куполы Экспедиция и Плотина соответственно). Согласно классификации из работы [Грунтоведение, 2005], лавы куполов относятся к породам средней прочности, прочным и очень прочным.

Зависимость прочности при одноосном сжатии от плотности пород хорошо выражена, причем она

является примерно одинаковой для андезитов с интерсертальной и гиалопилитовой структурами. Следует отметить, что повышенная плотность лав древних куполов обусловила более высокую прочность этих пород по сравнению с остальными, диапазон изменения плотности и прочности которых варьируется в широких пределах (см. рис. 4в). Наименьшей прочностью обладают самые молодые лавы (купол Высокий), наибольшей — менее древние (купол Плотина).

Прочность при растяжении изменяется от 2 до 23 МПа для андезитов с интерсертальной структурой (куполы Лохматый и Правильный соответственно), и от 3 до 8 МПа с гиалопилитовой структурой (куполы Погребенный и Побочный соответственно) (см. табл. 1). Зависимость прочности при растяжении от плотности пород также наблюдается, но она менее выражена, чем соотношение прочности при сжатии и плотности.

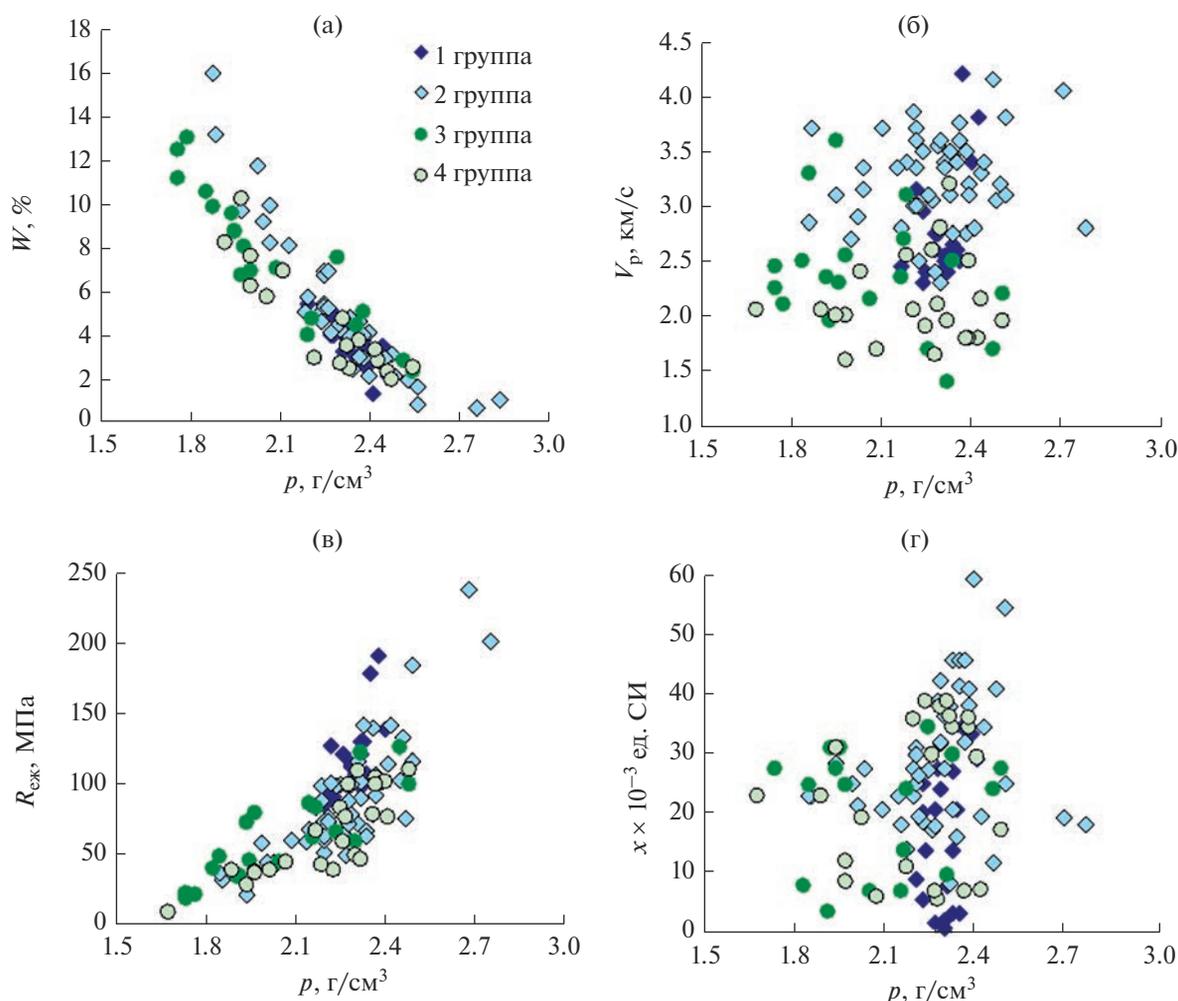


Рис. 4. Зависимость различных показателей свойств пород экструзий вулкана Безымянный от плотности. а – величина водопоглощения, б – скорость распространения продольных волн в воздушно-сухом состоянии, в – прочность при одноосном сжатии в воздушно-сухом состоянии, г – магнитная восприимчивость.

Магнитная восприимчивость пород изменяется в широком диапазоне – от 0.7×10^{-3} ед. СИ (купол Правильный) до 58.8×10^{-3} ед. СИ (купол Кулич) (см. табл. 1, рис. 4г). Это объясняется низким содержанием темноцветных и рудных минералов в дацитах древних экструзий и высоким содержанием таких минералов в андезитах более молодых куполов. Согласно классификации пород по значениям магнитной восприимчивости из работы [Грунтоведение, 2005], экструзивы вулкана Безымянный относятся к I–VI группам – от “очень слабо” до “хорошо намагничивающихся” (0 – 60×10^{-3} ед. СИ)

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сравнительная петрофизическая характеристика пород экструзивных куполов

В целом, породы древних куполов (более 11 тыс. лет, первая и вторая группы) имеют наи-

более высокие петрофизические показатели (см. табл. 1). Осредненные значения петрофизических свойств по каждому из куполов, показывают, что древние отличаются максимальной плотностью лав (до 2.39 г/см^3 – купол Кулич), минимальным водопоглощением (2.7 – 4.5% , кроме лав Ступенчатого – 7.4%), средней пористостью (15.2 – 19.1% , кроме лав Ступенчатого – 28.5%), максимальными (иногда средними) показателями физико-механических свойств (табл. 2). Например, прочность при одноосном сжатии пород в сухом состоянии варьируется от 75 до 138 МПа и в водонасыщенном от 60 до 111 МПа (куполы Ступенчатый и Правильный соответственно) (см. табл. 2). Скорости распространения продольных волн и, соответственно, показатели упругих свойств также максимальны у пород древних куполов Плотина, Ступенчатый и Двуглавый ($V_p = 3.35$ – 3.40 км/с).

Таблица 2. Средние величины показателей петрофизических и прочностных свойств экструзивных пород вулкана Безымянный

Экструзивный купол	ρ , г/см ³	ρ_s , г/см ³	n , %	W , %	V_p , км/с	$V_{pв}$, км/с	$R_{сж с'}$, МПа	$R_{сж в'}$, МПа	R_p , МПа	$\chi \times 10^{-3}$ СИ
1 группа (древние куполы)										
Гладкий	2.23	2.76	19.1	4.5	2.40	3.15	97	96	8	13.7
Правильный	2.30	2.76	16.6	3.4	2.95	3.60	138	111	13	18.8
Пестрые хребтики	2.30	2.72	16.0	3.7	2.60	3.00	101	78	8	22.4
2 группа (менее древние куполы)										
Плотина	2.32			3.9	3.40	4.05	90	65	8	33.8
Ступенчатый	2.12	2.81	28.5	7.4	3.35	4.00	75	60	8	24.6
Двуглавый	2.29	2.70	15.2	3.4	3.35	3.70	114	100	13	17.9
Кулич	2.39			3.4	2.95	3.60	103	96	12	32.9
3 группа (куполы возрастом 3300–5500 лет назад)										
Экспедиция	2.08	2.71	24.0	7.7	2.25	3.20	55	43	4	20.4
Побочный	2.00			8.3	2.50	3.65	65	52	6	22.7
4 группа (куполы на постройке вулкана Безымянный и внутри нее)										
Лохматый	2.04	2.69	22.4	6.3	2.10	3.35	50	32	4	15.6
Высокий	2.09	2.66	14.7	3.6	2.65	3.35	94	89	6	36.0
Погребенный	2.28			2.7	2.20	3.35	62	40	4	35.0
Новый	2.38	2.75	12.7	2.9	1.85	3.05	88	77	7	17.1

Примечание. Названия и обозначения показателей свойств пород приведены в тексте статьи.

Породы современного купола Новый, несмотря на относительно высокую плотность, отличаются крайне низкими значениями скорости распространения продольных волн: 1.85 км/с в воздушно-сухом и 3.05 км/с в водонасыщенном состоянии (см. табл. 2). Этот факт требует дополнительного изучения. Предположительно, это может быть связано с наименьшей степенью раскристаллизованности основной массы современных андезитов и наличием микротрещиноватости, замедляющей прохождение упругой волны сквозь породу.

Породы куполов Экспедиция и Побочный, представляющих третью группу (3300–5500 лет), и купола Лохматый, относящегося к четвертой группе (1350–1000 лет), характеризуются низкой плотностью (2.00–2.08 г/см³), средней величиной водопоглощения (6.3–8.3%), повышенной пористостью (22.4–24.0%), низкими скоростями продольных волн (2.10–2.50 км/с в сухом и 3.20–3.65 км/с в водонасыщенном состоянии), средней прочностью при одноосном сжатии (50–65 МПа в сухом и 32–52 МПа в водонасыщенном состоянии) (см. табл. 2).

Хотя купол Лохматый отнесен нами к четвертой группе, т.к. находится на постройке стратовулкана Безымянный, и его возраст оценивается как 1000–1350 лет [Брайцева и др., 1990], показатели свойств его лав очень близки с породами

третьей группы (см. табл. 1, 2). В различных публикациях неоднократно указывалось на сходство пород куполов Экспедиция и Лохматый по строению, содержанию гомеогенных включений, петрографии и т.д. [Богоявленская, 1957; Горшков, Богоявленская, 1965; Ермаков, 1977]. Это сходство подтверждается и показателями петрофизических свойств лав этих куполов. В.А. Ермаков [1977] считал купол Экспедиция более древним, чем Лохматый. О.А. Брайцева с соавторами [1990] определили им конкретные разные возрасты образования. На основании изучения петрофизических свойств лав этих куполов, полагаем, что куполы Экспедиция и Лохматый формировались примерно в одно время, то есть имеют примерно один возраст: 3300–5500 лет.

Рассмотрим средние показатели петрофизических свойств экструзивных пород вулкана Безымянный, включив купол Лохматый в третью группу (табл. 3). Первая группа лав куполов представлена дацитами, вторая – преимущественно роговообманковыми андезитами с небольшой долей пироксеновых андезитов, третья – роговообманковыми андезитами, четвертая – преимущественно пироксеновыми андезитами с небольшой долей роговообманковых андезитов.

Средняя плотность лав куполов первой, второй и четвертой групп одинакова, третьей – значительно меньшая (2.28 и 2.05 г/см³ соответствен-

Таблица 3. Петрофизические и прочностные свойства экструзивов вулкана Безымянный

Куполы	ρ , г/см ³	ρ_s , г/см ³	n , %	V_p , км/с	$R_{сж с}$, МПа	$\chi \times 10^{-3}$ СИ
1 группа	<u>2.28 (21)</u>	<u>2.76 (21)</u>	<u>17 (21)</u>	<u>2.65 (21)</u>	<u>112 (21)</u>	<u>18.3 (21)</u>
	2.2–2.38	2.68–2.76	14–22.1	2.3–4.2	86–179	0.7–28.9
2 группа	<u>2.27 (51)</u>	<u>2.75 (2)</u>	<u>22 (7)</u>	<u>3.26 (51)</u>	<u>95 (51)</u>	<u>27.3 (48)</u>
	1.85–2.75	2.7–2.81	12.6–28.5	2.3–4.15	22–238	8.2–58.8
3 группа	<u>2.05 (27)</u>	<u>2.70 (7)</u>	<u>23 (15)</u>	<u>2.30 (27)</u>	<u>58 (27)</u>	<u>19.9 (25)</u>
	1.74–2.48	2.61–2.75	7.8–35.6	1.4–3.6	19–126	3.4–37.4
4 группа	<u>2.28 (15)</u>	<u>2.71 (4)</u>	<u>19(4)</u>	<u>2.11(14)</u>	<u>73(15)</u>	<u>25.1(15)</u>
	1.68–2.48	2.66–2.76	12.7–36.8	1.65–3.2	10–111	5.4–38.4

Примечание. В числителе: среднее значение, в скобках – количество образцов; в знаменателе: минимальное и максимальное значения.

но). Плотность твердой фазы более древних лав немного выше, чем молодых (2.75–2.76 г/см³ и 2.70–2.71 г/см³ соответственно). Средняя пористость примерно одинакова для пород первой и четвертой (17–19%) и второй и третьей (22–23%) групп куполов, хотя диапазон ее изменения самый широкий у лав третьей группы (7.8–35.6%) (см. табл. 3). Средние значения скорости продольных волн пород последовательно убывают от более древних пород первой и второй групп (2.65 и 3.26 км/с соответственно) к самым молодым андезитам четвертой группы (2.11 км/с). Средняя прочность при одноосном сжатии наибольшая у древних лав дацитового состава, наименьшая у роговообманковых андезитов, хотя диапазон изменения значений прочности пород в пределах второй, третьей и четвертой групп достаточно широк, а максимально прочными являются пироксеновые андезиты купола Плотина. Средние значения магнитной восприимчивости можно выстроить в последовательный ряд в зависимости от состава пород: дациты – 18.3×10^{-3} СИ, роговообманковые андезиты – 19.9×10^{-3} СИ, преимущественно пироксеновые андезиты – 25.1×10^{-3} СИ, роговообманковые и пироксеновые андезиты – 27.3×10^{-3} СИ. Следует отметить, что наиболее высокие показатели магнитной восприимчивости характерны для пироксеновых андезитов, в которых доля вкрапленников достигает 50%, а содержание рудных минералов не превышает 10% (купол Кулич).

В целом, петрофизические свойства, как древних, так и молодых экструзивных пород похожи, и по значениям параметров достаточно близки (см. табл. 3). Однако факторы, определяющие свойства, различны для древних и молодых пород.

Известно, что экструзивные куполы имеют зональное строение [Борисова, Борисов, 1974; Macdonald, 1972]. При появлении экструзивных лав на дневной поверхности, их внешние слои, веро-

ятно, “вспениваются”, по аналогии с современными лавовыми потоками, выжимающимися на склоны купола Новый [Ладыгин и др., 2012]. Древние экструзии, сформированные более 11 тыс. лет назад, постепенно утратили внешние пористые хрупкие слои, и в настоящее время на поверхности обнажаются их более массивные и монолитные центральные части (как показатель этого – многочисленные осыпи на склонах куполов). Именно поэтому породы первой и второй групп куполов имеют более высокие значения петрофизических свойств. Самые молодые породы четвертой группы лишь недавно появились на поверхности земли (около 40–1000 лет назад), они не были подвержены длительному разрушению под действием выветривания и их петрофизические параметры также высоки. Породы третьей группы образовались, вероятно, 3300–5500 лет назад. Прошло достаточно времени, чтобы ослабить породы и понизить их прочность, но не столько, чтобы на поверхности земли остались только монолитные части этих экструзий.

Сравнительная петрофизическая характеристика пород экструзивных куполов и лавовых потоков

Условия образования экструзивных и эффузивных пород вулкана Безымянный были различными: длительное выжимание вязкого расплава на площади от 0.1 до 2.12 км² (экструзивные куполы) и относительно быстрое формирование лавовых потоков протяженностью от 300 м до 5 км. Высота отдельных куполов Безымянного, состоящих из множества блоков лавы, достигает 280 м, мощность лавовых потоков – до 25–30 м. Различия в условиях кристаллизации (скорость и время остывания магматического расплава, давление, газовая составляющая) приводят к разнообразию формирующихся структур, среди которых порфировые и афировые, гиалопилитовые и интер-

Таблица 4. Петрофизические и прочностные свойства пород вулкана Безымянный разного генезиса

Относительный возраст образований	ρ , г/см ³	ρ_s , г/см ³	n , %	V_p , км/с	$R_{сж\ с}$, МПа	$\chi \times 10^{-3}$ СИ
Экструзивы						
Древние (1–3 группы)	$\frac{2.21(108)}{1.68-2.68}$	$\frac{2.73(32)}{2.61-2.82}$	$\frac{19(45)}{7.8-36.8}$	$\frac{2.85(107)}{1.4-4.2}$	$\frac{84(108)}{10-238}$	$\frac{24(103)}{0.7-58.8}$
Молодые (купол Новый)	$\frac{2.38(6)}{2.26-2.48}$	$\frac{2.75(2)}{2.75-2.76}$	13 (2)	$\frac{1.85(6)}{1.65-2.15}$	$\frac{88(6)}{77-102}$	$\frac{17.1(6)}{6.8-35.7}$
Эффузивы (из работы [Ладыгин и др., 2012])						
Древние	$\frac{2.43(53)}{1.49-2.73}$	$\frac{2.81(53)}{2.71-2.91}$	$\frac{13(53)}{4-45}$	$\frac{3.12(53)}{1.75-4.65}$	$\frac{115(53)}{18-221}$	$\frac{23.1(53)}{3-87}$
Молодые	$\frac{1.94(21)}{1.13-2.47}$	$\frac{2.71(21)}{2.67-2.75}$	$\frac{28(21)}{8-58}$	$\frac{1.81(21)}{1.5-2.1}$	$\frac{44(19)}{3-169}$	$\frac{18.5(20)}{1.4-47}$

Примечание. В числителе: среднее значение, в скобках – количество образцов; в знаменателе: минимальное и максимальное значения.

сертальные, реже микролитовые, что, в свою очередь, влияет на свойства пород. Вероятно, что главной причиной особенных свойств экструзивных и эффузивных пород являются разные условия их формирования. Что касается минерального состава, то во всех группах пород преобладают вулканическое стекло и плагиоклаз, в меньших количествах присутствуют рудные минералы, роговая обманка и/или пироксены.

Наибольшей средней плотностью пород обладают древние лавовые потоки (2.43 г/см³), несколько меньшие ее значения характерны для молодых и древних экструзивов (2.38 и 2.21 г/см³ соответственно), самые низкие присущи молодым лавовым потокам (1.94 г/см³) (табл. 4).

Как было показано в работе [Ладыгин и др., 2012], лавам потоков вулкана Безымянный присущи небольшие скорости продольных волн. Связано это с микротрещиноватостью вулканистов, обусловленной, в свою очередь, условиями застывания и кристаллизации таких пород [Ладыгин, Никитин, 1980]. Отметим, что тенденция повышения скорости продольных волн от молодых пород к более древним характерна как для экструзивных куполов, так и для лавовых потоков (см. табл. 4).

Прочность при одноосном сжатии выше у более древних пород, по сравнению с молодыми, независимо от их принадлежности к экструзивному или эффузивному типу образований (см. табл. 4). Как указывалось выше, а также в работе [Ладыгин и др., 2012], это связано с разрушением с течением времени в результате выветривания пористых внешних слоев древних экструзивных блоков и лавовых потоков. Сегодня от них оста-

лись только монолитные части, имеющие повышенную прочность.

Особенностью пород вулкана Безымянный является то, что наименьшие значения магнитной восприимчивости присущи современным лавам как экструзий, так и потоков, наибольшие – более древним породам этих образований, в которых преобладают роговообманковые и пироксеновые андезиты.

В заключение рассмотрим важный вопрос, возникающий во время картирования вулкано-генных образований: как определить генезис близких по составу пород? Применение петрофизических характеристик пород для разделения вулканогенных образований различного генезиса, описано, например, в работе [Канцель и др., 1968]. Рассмотрим возможность разделения пород вулкана Безымянный разного генезиса (экструзивы и эффузивы) по их петрофизическим свойствам, тем более, что согласно работе [Борисова, Борисов, 1974], ни общий химический, ни минеральный составы не позволяют надежно различать породы лавовых потоков и экструзивных куполов.

В целом, показатели петрофизических свойств пород древних лавовых потоков (средние плотность, плотность твердой фазы, скорость продольных волн и прочность) выше, чем средние значения свойств пород всех групп экструзивов и молодых лавовых потоков. В свою очередь, лавы молодых потоков обладают наименьшими показателями свойств среди вышеуказанных пород, кроме этого, вспененные лавы верхних частей молодых лавовых потоков имеют повышенную пористость, достигающую 58% (см. табл. 4). Следовательно, если неясного генезиса лавы андезитового состава имеют крайне низкие показатели

всех петрофизических свойств и высокую пористость, то с высокой вероятностью можно заключить, что они представляют собой молодые породы эффузивного происхождения. И, напротив, высокие показатели петрофизических свойств будут указывать на древние породы эффузивного генезиса. Экструзивные породы, согласно показателям петрофизических свойств, независимо от возраста, занимают промежуточное положение между молодыми и древними породами лавовых потоков.

Таким образом, детальный петрофизический анализ позволяет разделять близкие по петрографическому составу породы разного генезиса, в частности, экструзивного и эффузивного происхождения.

ВЫВОДЫ

1. Породы, слагающие экструзивные куполы вулкана Безымянный, относятся к дацитам и андезитам роговообманковым и пироксеновым. Породы разных куполов содержат от 10 до 80% порфировых вкрапленников, представленных плагиоклазом (отмечается во всех породах), роговой обманкой, пироксеном, рудными минералами (титаномагнетит и магнетит в количестве от 5 до 30%, преимущественно 10%). Основная масса всех пород неизменно состоит из вулканического стекла, плагиоклаза и рудных минералов, которые “разбавляются” роговой обманкой и/или пироксеном в разных соотношениях.

2. Изученные петрофизические свойства пород экструзивных куполов варьируются в широком диапазоне в зависимости от минерального состава, структурно-текстурных особенностей, пористости, микротрещиноватости: плотность от 1.74 до 2.75 г/см³ (большинство значений (72%) содержится в интервале 2.2–2.5 г/см³); скорость продольных волн – в пределах от 1.4 до 4.2 км/с; прочность на одноосное сжатие – от 22 до 238 МПа; магнитная восприимчивость – в пределах от 0.7 до 58.8 × 10⁻³ СИ.

3. Одной из особенностей пород экструзивных куполов являются относительно низкие значения скоростей упругих волн вне зависимости от структуры и пористости, что в целом характерно для вулканических пород верхнеплейстоцен-голоценового возраста.

4. Обнаружена тенденция повышения плотности, прочности, скорости упругих волн от молодых пород к более древним экструзивам. По-видимому, это связано с постепенным разрушением внешних пористых слоев экструзивного купола и выходом на дневную поверхность более массивных и монолитных внутренних его частей.

5. На примере вулкана Безымянный показано, что условия протекания экструзивных и эффу-

зивных процессов влияют на петрофизические свойства формирующихся пород. Различия петрофизических параметров пород можно применять для уточнения генезиса сходных по петрографическим характеристикам вулканитов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алидибиров М.А., Богоявленская Г.Е., Кирсанов И.Т. и др.* Извержение вулкана Безымянный в 1985 г. // Вулканология и сейсмология. 1988. № 6. С. 3–17.
- Богоявленская Г.Е.* Вулкан Безымянный и его экструзивные образования // Бюлл. вулканол. станций. 1957. № 26. С. 3–13.
- Богоявленская Г.Е.* Вулкан Безымянный на Камчатке и его агломератовый поток // Тр. Лаб. вулканологии АН СССР. 1960. Вып. 18. С. 3–34.
- Богоявленская Г.Е., Брайцева О.А., Мелекесцев И.В. и др.* Вулкан Безымянный // Действующие вулканы Камчатки. В 2-х томах. Т. 1 / Отв. ред. С.А. Федотов, Ю.П. Масуренков. М.: Наука, 1991. С. 168–194.
- Богоявленская Г.Е., Кирсанов И.Т.* Двадцать пять лет вулканической активности вулкана Безымянного // Вулканология и сейсмология. 1981. № 2. С. 3–13.
- Борисов О.Г., Борисова В.Н.* Экструзии и связанные с ними газо-гидротермальные процессы / Отв. ред. К.Н. Рудич. Новосибирск: Наука, 1974. 198 с.
- Брайцева О.А., Кирьянов В.Ю.* О прошлой активности вулкана Безымянный по данным тефрохронологических исследований // Вулканология и сейсмология. 1982. № 6. С. 44–45.
- 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.
- Гирина О.А.* Пирокластические отложения современных извержений андезитовых вулканов Камчатки и их инженерно-геологические особенности / Отв. ред. И.В. Мелекесцев. Владивосток: Дальнаука, 1998. 173 с.
- Гирина О.А., Лупян Е.А., Маневич А.Г. и др.* Дистанционный мониторинг эксплозивных извержений вулкана Безымянный в 2022 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Электронный сборник материалов 20-й Международной конференции, 14–18 ноября 2022 г. М.: ИКИ РАН, 2022. С. 264.
<https://doi.org/10.21046/20DZZconf-2022a>
- Гирина О.А., Мельников Д.В., Маневич А.Г. и др.* Анализ событий эксплозивного извержения вулкана Безымянный 21 октября 2020 г. по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 5. С. 297–303.
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-5-297-303>
- Горшков Г.С.* Извержение сопки Безымянной (предварительное сообщение) // Бюлл. вулканол. станций. 1957. № 26. С. 19–72.
- Горшков Г.С., Богоявленская Г.Е.* Вулкан Безымянный и особенности его последнего извержения 1955–1963 гг. / Отв. ред. Б.И. Пийп. М.: Наука, 1965. 170 с.
- Грунтоведение / Отв. ред. В.Т. Трофимов. М.: Изд-во МГУ, 2005. 1024 с.

- Ермаков В.А.* Формационное расчленение четвертичных вулканических пород. М.: Недра, 1977. 223 с.
- Заварицкий А.Н.* Вулканы Камчатки // Тр. Лаб. вулканологии. 1955. Вып. 10. 152 с.
- Иванов Б.В.* Андезиты Камчатки: справочник химических анализов вулканитов и основных породообразующих минералов / Отв. ред. А.В. Колосков. М.: Наука, 2008. 470 с.
- Канцель А.В., Лаверов Н.П., Розанов Ю.А. и др.* Об использовании данных о физико-механических свойствах вулканогенных пород для решения вопросов их генезиса // Физико-механические свойства горных пород верхней части земной коры / Отв. ред. А.Ю. Розанов. М.: Наука, 1968. С. 280–285.
- Кирсанов И.Т.* Экструзивные извержения на вулкане Безымянном в 1965–1977 гг. и их геологический эффект // Проблемы глубинного магматизма / Отв. ред. В.С. Соболев. М.: Наука, 1979. С. 50–68.
- Кирсанов И.Т., Студеникин Б.Ф., Рожков А.М. и др.* Новый этап извержения вулкана Безымянного // Бюлл. вулканол. станций. 1971. № 47. С. 15–22.
- Козырев А.И.* Результаты измерения плотности лав Ключевского вулкана // Вулканология и сейсмология. 1990. № 1. С. 65–75.
- Конради С.А.* Краткий предварительный отчет о работах партии Геологического отряда Камчатской экспедиции Ф.П. Рябушинского в 1909–1910 гг. // Отчет Географического общества за 1911 г. СПб.: Изд-во Географ. общества, 1911.
- Лабораторные работы по грунтоведению / Учебное пособие / Отв. ред. В.Т. Трофимов, В.А. Королёв. М.: КДУ, 2017. 654 с.
- Ладыгин В.М.* Петрогенетические закономерности формирования и изменения свойств четвертичных эффузивов основного–среднего состава // Сергеевские чтения. Материалы годичной сессии ИС РАН, 21 марта 2014 г. М.: РУДН, 2014. Вып. 16. С. 43–48.
- Ладыгин В.М., Гирина О.А., Фролова Ю.В.* Петрофизические особенности лавовых потоков вулкана Безымянный, Камчатка // Вулканология и сейсмология. 2012. № 6. С. 18–30.
- Ладыгин В.М., Гирина О.А., Фролова Ю.В., Округин В.М.* Физико-механические свойства пород вулкана Безымянный // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы XXII Всероссийской научной конференции, посвященной Дню вулканолога, 28–29 марта 2019 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2019. С. 90–93.
- Ладыгин В.М., Никитин С.Н.* О некоторых особенностях свойств молодых эффузивов Камчатки // Вестник МГУ. 1980. № 5. С. 81–86.
- Ладыгин В.М., Округин В.М.* Петрофизические свойства базальтов Большого Трещинного Толбачинского извержения // Вестник МГУ. Сер. геол. 1998. № 3. С. 45–49.
- Ладыгин В.М., Рычагов С.Н., Фролова Ю.В. и др.* Преобразование рыхлых пирокластических отложений в туфы // Вулканология и сейсмология. 2001. № 4. С. 29–38.
- Ладыгин В.М., Фролова Ю.В.* Использование петрофизических исследований при решении вулканологических задач // Вулканизм и геодинамика. Материалы III Всероссийского симпозиума по вулканологии и палеовулканологии, 5–8 сентября 2006 г. Улан-Удэ: Бурятский научный центр СО РАН, 2006. Т. 1. С. 42–46.
- Ладыгин В.М., Фролова Ю.В.* Особенности петрофизических свойств эффузивов Ключевского вулкана // Вулканология и сейсмология. 2002. № 3. С. 28–32.
- Ладыгин В.М., Фролова Ю.В., Округин В.М., Гирина О.А.* О возможности использования петрофизических исследований (на примере эффузивов Северной группы вулканов Камчатки) // Материалы Всероссийской конференции, посвященной 75-летию Камчатской вулканологической станции им. Ф.Ю. Левинсона-Лессинга, 9–15 сентября 2010 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2010. http://www.ksc-net.ru/ivs/slsecret/75-VS/Material_conferenc/art12.pdf.
- Ладыгин В.М., Фролова Ю.В., Спиридонов Э.М.* О явлении аномально низких значений скоростей продольных волн современных базальтоидов // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2018. Т. 37. № 1. С. 20–31.
- Ладыгин В.М., Фролова Ю.В., Спиридонов Э.М.* Формирование физико-механических свойств эффузивных пород // Инженерная геология. 2016. № 3. С. 36–45.
- Озеров А.Ю., Арискин А.А., Кайл Ф. и др.* Петролого-геохимическая модель генетического родства базальтового и андезитового магматизма вулканов Ключевской и Безымянный, Камчатка // Петрология. 1997. Т. 5. № 6. С. 614–635.
- Тимербаева К.М.* Петрология Ключевских вулканов на Камчатке / Отв. ред. Г.Е. Богоявленская. М.: Наука, 1967. 207 с.
- Пуйн Б.И.* Ключевская сопка и ее извержения в 1944–1945 гг. и в прошлом // Тр. Лаб. вулканологии АН СССР. 1956. Вып. 11. 311 с.
- Фролова Ю.В.* Скальные грунты и методы их лабораторного изучения. М.: КДУ, 2015. 222 с.
- Almeev R.R., Kimura J.-I., Ariskin A.A., Ozerov A.Y.* Decoding crystal fractionation in calc-alkaline magmas from the Bezymianny Volcano (Kamchatka, Russia) using mineral and bulk rock compositions // J. Volcanology and Geothermal Research. 2013. V. 263. P. 141–171. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2013.01.003>
- Braitseva O.A., Melekestsev I.V., Ponomareva V.V., Sulerzhitsky L.D.* The ages of calderas, large explosive craters and active volcanoes in the Kuril–Kamchatka region, Russia // Bulletin of Volcanology. 1995. V. 57(6). P. 383–402.
- Girina O.A.* Chronology of Bezymianny Volcano activity, 1956–2010 // J. Volcanology and Geothermal Research. 2013. V. 263. P. 22–41. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2013.05.002>
- Girina O.A., Gorbach N.V., Davydova V.O. et al.* The 15 March 2019 Bezymianny Volcano Explosive Eruption and Its Products // J. Volcanology and Seismology. 2020. V. 14. № 6. P. 394–409. <https://doi.org/10.1134/S0742046320060032>
- Macdonald G.A.* Volcanoes. New Jersey: Prentice-Hall, 1972. 544 p.
- Ozerov A.Yu., Girina O.A., Zharinov N.A. et al.* Eruptions in the Northern Group of Volcanoes, in Kamchatka, during the Early 21st Century // J. Volcanology and Seismology. 2020. V. 14. P. 1–17. <https://doi.org/10.1134/S0742046320010054>

Petrophysical and Strength Properties of Extrusive Rocks of the Bezymianny Volcano, Kamchatka

V. M. Ladygin¹, O. A. Girina^{2, *}, and Yu. V. Frolova¹

¹*Geology Faculty, Lomonosov Moscow State University, Leninskiye Gory, 1, Moscow, 119991 Russia*

²*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, bulvar Piipa, 9, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006 Russia*

**e-mail: girina@kscnet.ru*

For the first time, the results of petrophysical studies of the Bezymianny volcano extrusive rocks from dacites to andesites are presented. A comparative characteristic of the extrusive rocks properties is given according to the selected age groups. The dynamics of changes in the properties of extrusion rocks depending on their age is shown: it is established that the older the rocks, the higher the indicators of their density, strength and elastic properties. The petrophysical features of the rocks of the extrusive domes and lava flows are compared. The applicability of petrophysical properties to clarify the genesis of rocks similar in petrographic characteristics, in particular, of extrusive and effusive origin, is substantiated.

Keywords: Bezymianny volcano, extrusive dome, petrophysical properties