УДК 552.323.4

ЭРУПТИВНЫЕ ПРОДУКТЫ ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНА БЕЗЫМЯННЫЙ 7 АПРЕЛЯ 2023 ГОДА

© 2024 г. В. О. Давыдова^{1, *}, Р. А. Кузнецов², О. В. Дирксен², Д. В. Мельников², А. Б. Ермолинский¹, В. О. Япаскурт¹

¹Геологический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия ²Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, бульвар Пийпа, 9, Петропавловск-Камчатский, 683006 Россия *e-mail: vestadav@gmail.com

> Поступила в редакцию 11.02.2024 г. После доработки 22.03.2024 г. Принята к публикации 27.06.2024 г.

В работе приводятся первые данные о вещественном составе эруптивных продуктов пароксизмального эксплозивного извержения вулкана Безымянный, произошедшего 7 апреля 2023 года. Благодаря уникальной коллекции, включающей отобранные непосредственно во время извержения пемзовидные лапилли, а также материал ювенильных блоков из пирокластических потоков, удалось выявить интересные закономерности как в содержании макрокомпонентов, так и отдельных халькофильных элементов (меди). Рассматриваемые породы относятся к умеренно-калиевым двупироксеновым андезибазальтам (55.5–57 мас. % SiO₂), мафические включения характеризуются несколько более примитивным составом (53.7 мас. % SiO₂). Согласно данным минеральной геотермометрии, кристаллизация вкрапленников андезибазальтов происходила при температуре 940–960°С, а формирование кайм – при 980°С, что соответствует температуре магмы непосредственно перед извержением. Состав вулканического стекла позволяет оценить давление, при котором было достигнуто последнее перед подъемом магмы на поверхность равновесие с кристаллизующимися фазами (0.5–0.6 кбар). На основании полученных данных высказано предположение о возможной эволюции приповерхностного очага вулкана Безымянный за период 2017–2023 гг.

Ключевые слова: вулкан Безымянный, андезиты, островодужный магматизм

DOI: 10.31857/S0203030624050025, EDN: HNNFCS

ВВЕДЕНИЕ

Вулкан Безымянный расположен в центральной части Ключевской группы вулканов и является одним из самых активных андезитовых островодужных вулканов мира. С начала современного эруптивного цикла (1955–1956 гг.) произошло 58 крупных эксплозивных извержений [Girina, 2013; Сенюков и др., 2023].

Согласно данным Камчатской группы реагирования на вулканические извержения [KVERT, http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/, Гирина и др., 2023] активность вулкана начала усиливаться в последних числах марта 2023 г.: 29 марта

произошло сильное эксплозивное извержение, облако поднялось до 6 км н.у.м. и распространилось на 25 км на северо-восток от вулкана. Со 2 апреля начало расти количество обломочных лавин, а после 5 апреля они обрушивались почти непрерывно [Гирина и др., 2023]. Пароксизмальное извержение произошло 7 апреля, эруптивное облако поднялось до высоты 10–12 км н.у.м., а пепловый шлейф распространился на расстояние более 2000 км на востокюго-восток от вулкана. По долинам Южная и Восточная сошли пирокластические потоки, длина которых достигала 6 км. По оценкам [Гирина и др., 2023], индекс эксплозивности



Рис. 1. Отложения эксплозивного извержения вулкана Безымянный 7 апреля 2023 г. а — пирокластические отложения на склонах вулкана Безымянный после извержения. Снимок со спутника Sentinel-2 29 апреля 2023 г. (https://www.sentinel-hub.com/). Звездочками отмечены места отбора образцов в апреле (зеленые) и в августе (желтая) 2023 г.; б — внутренняя часть ювенильного блока, август 2023 г.; в — поверхность пирокластического потока, август 2023 г.

этого извержения составил около 2. Сотрудники полевого отряда ИВиС "Эруптивный" находились непосредственно в зоне пеплопада и смогли зафиксировать его особенности, а также отобрать образцы свежего материала.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Образцы эруптивных продуктов пароксизмального извержения были отобраны в два этапа: непосредственно во время извержения в апреле 2023 г., а также в августе 2023 г. Характерной особенностью тефры, формировавшейся в ходе извержения на некотором удалении от вулкана (рис. la, зеленые звёздочки), была отчетливая бимодальность размеров обломков: из пепловой тучи одновременно выпадали очень тонкий пепел и крупные пемзовидные лапилли (очень пористые обломки неправильной формы, преимущественно светло-серого цвета) диаметром от l до 8 см (рис. 2a). Для характеристики тефры пароксизмальной фазы извержения были проанализированы крупные пемзовидные лапилли размером





Хорошо видны падающие пемзовидные лапилли. Они же отчетливо выделяются на засыпанном тонким пеплом снегу (а). Лапилли на снегу возле камня Амбон на следующий день после извержения (08.04.2023, фото И.А. Нуждаева) (б). Пемзовидные лапилли тефры вулкана Безымянный непосредственно после отбора (фото В.И. Фролова) (в).

ВУЛКАНОЛОГИЯ И СЕЙСМОЛОГИЯ № 5 2024

от 3 до 5 см, отобранные 07.04.2023 на правом борту реки Сухая Хапица (55.938809 с.ш., 160.767161 в.д.) и 08.04.2023 возле Камня Амбон (см. рис. 1а, 2; 55.950000 с.ш., 160.751650 в.д.).

В августе 2023 г. был опробован пирокластический поток, сошедший в долину Восточная (см. рис. 1а, 1б, 1в). Пирокластический поток сложен, главным образом, свежим ювенильным материалом. Среди обломков резко преобладают округлые блоки и бомбы со следами пластических деформаций и остывания, резургентные обломки (фрагменты постройки вулкана и продукты более ранних извержений) встречаются значительно реже. Максимальный размер ювенильных блоков составляет около 5 м, преобладают блоки зеленовато-серого цвета снаружи и темно-серого, до черного, внутри. Значительно реже встречаются блоки темно-серого, практически черного цвета, диаметром до 0.5-1 м. Наиболее редко встречаются угловатые обломки черного, темно-серого и красновато-коричневого цветов. В ювенильных блоках встречаются мафические включения, и ксенолиты разного генезиса. Для данной работы нами были проанализированы образцы ювенильных блоков зеленовато-серого и черного цветов, а также обнаруженные мафические включения.

Изучение состава минералов и вулканических стекол, а также получение фотографий в отраженном свете проводилось в лаборатории локальных методов исследования вещества Геологического факультета МГУ (г. Москва) при помощи сканирующего электронного микроскопа Jeol JSM-IT500 с вольфрамовым термоэмиссионным катодом, оснащенным энергодисперсионным спектрометром "X-Max^N", Oxford Instruments (20 кВ, 0.7 нА). В качестве эталонов использовались стандарты Смитсониановского института [Jarosewich et al., 1980], а также стандарты металлов, стехиометричных оксидов и сульфидов.

Определение валового химического состава пород выполнено в ЦКП ИГЕМ РАН (г. Москва) методом рентгеноспектрального флюоресцентного анализа (XRF) на вакуумном спектрометре последовательного действия с дисперсией по длине волны Axios mAX (PANalytical, Нидерланды). Спектрометр снабжен рентгеновской трубкой мощностью 4 кВт с Rh-анодом, максимальное напряжение на трубке 60 кВ, максимальный анодный ток – 160 мА.

Для определения пористости методом компьютерной рентгеновской томографии использовался прибор Yamato TDM 1000H-II. Непосредственно расчет пористости по результатам томографии производился при помощи программного обеспечения – VGStudio Max 2.2. Поскольку исследуемые лапилли имеют неправильную форму, для снижения вклада краевых артефактов съемки в получаемый результат при расчете их пористости использовался не весь объем лапилли, а их некоторая центральная цилиндрическая область. В связи с тем, что разрешающая способность томографа ограничена, при объеме исследуемой области 2500-4100 мм³ в расчете возможно учесть только поры, линейный размер которых превышает 0.2-0.25 мм.

Помимо определения пористости методом компьютерной томографии, для образцов методом гидростатического взвешивания был определен объем, что при известной массе позволило посчитать пористость. Плотность твердой компоненты лапилли при этом была принята равной 2.67 г/см³ [Mueller et al., 2011].

Для расчета пористости также использовался анализ панорамных BSE-изображений с помощью программного обеспечения ImageJ, по методике, ранее описанной [Plechov et al., 2015].

Количественная оценка мощности вулканического теплового излучения (Volcanic Radiative Power, VRP) определялась методом, основанном на анализе мультиспектральных ночных наблюдений из космоса с помощью радиометров VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite), расположенных на борту метеорологических спутников Suomi NPP, NOAA-20 и NOAA-21. С помощью алгоритма VIIRS Nightfire (VNF) обрабатывается группа спутниковых изображений в видимом и девяти инфракрасных спектральных диапазонах [Elvidge et al., 2013; Zhizhin et al., 2021]. Алгоритм может независимо обнаруживать субпиксельные инфракрасные излучатели (термальные аномалии) в коротковолновом (SWIR) и средневолновом инфракрасном (MWIR) спектре и характеризовать эти излучатели по местоположению, размеру и температуре, если сигнал превышает уровень шума в двух или более инфракрасных диапазонах. Алгоритм выделяет высокотемпературные

Образец	ОДВ2	ОДВ3	ОДВ4	VK2302	VK2302c	VK2302a
Тип	лапилли	лапилли	лапилли	бомба	бомба	мафическое
Пористость, об. %	76	72	68			включение
SiO ₂	56.96	56.30	55.47	55.90	55.97	53.74
TiO ₂	0.79	0.80	0.83	0.80	0.81	0.97
Al ₂ O ₃	17.97	18.14	18.03	17.98	18.20	17.94
FeO	7.46	7.57	7.89	7.64	7.68	8.83
MnO	0.15	0.16	0.17	0.16	0.16	0.18
MgO	4.09	4.23	4.44	4.31	4.32	5.06
CaO	7.86	8.18	8.44	8.25	8.15	8.86
Na ₂ O	3.42	3.39	3.49	3.66	3.47	3.32
K ₂ O	1.12	1.05	1.08	1.12	1.07	0.95
P ₂ O ₅	0.17	0.17	0.16	0.17	0.17	0.14
ППК	1.46	0.38	0.07	0.28	0.08	0.11
Cr	47	35	51	36	38	35
V	200	179	209	174	189	216
Со	n.d.	n.d.	n.d.	23	24	25
Ni	15	14	15	18	18	21
Cu	82	81	81	65	65	152
Zn	104	78	80	74	74	79
Rb	20	20	20	22	23	19
Sr	289	319	312	322	324	319
Zr	133	91	90	99	96	83
Ba	395	427	395	415	356	341
Y	20	20	21	21	22	20
Nb	3	4	3	n.d.	n.d.	n.d.

Таблица 1. Валовый химический состав образцов эруптивных продуктов извержения 7 апреля 2023 г.

Примечание. Петрогенные элементы приведены в пересчете на 100 мас. % сухого вещества, концентрации микроэлементов – в г/т; n.d. – нет данных.

(от 400 до 1600°С) источники тепловой эмиссии – лавовые потоки, горячие лавовые купола [Trifonov et al., 2017; Мельников и др., 2018].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Валовый состав

Изученные образцы по валовому химическому составу отвечают андезибазальтам (55.5–57 мас. % SiO₂, табл. 1). Значимых отличий в валовом составе зеленовато-серых и черных ювенильных бомб и блоков пирокластического потока не обнаружено (рис. 3). Состав бомб и наиболее примитивных лапилли из тефры отличается незначительно, вариации среди образцов лапилли несколько шире. От образа к образцу изменяется содержание SiO₂, MgO, FeO – наименее эволюционировавший состав (обр. ОДВ4, 55.5 мас. % SiO₂, 4.4 мас. % MgO, 7.9 мас. % FeO) отмечается у наименее пористого (из измеренных) образца лапилли – с 68 об. % пор (табл. 2), наиболее эволюционировавший (57 мас. % SiO₂, 4 мас. % MgO, 7.5 мас. % FeO) – у самого пористого, ОДВ2, с 76 об. % пор. Содержания щелочей (3.4–3.5 мас. % Na₂O, ~ 1.1 мас. % K₂O) и других петрогенных элементов от образца



Рис. 3. Валовый состав продуктов извержения 7 апреля 2023 г. в сравнении с составами продуктов других извержений современного эруптивного цикла (составы приведены согласно работам [Turner et al., 2013; Гирина и др., 2019; Davydova et al., 2022, 2024]).

к образцу практически не меняются. Наиболее пористый образец ОДВ2 также несколько обеднен Sr (290 г/т vs 310-320 г/т) и обогащен Zn и Zr (104 и 133 г/т vs 80 и 90 г/т) относительно двух других лапилли (ОДВ3 и ОДВ4), тогда как концентрация Rb (20 г/т) выдержанна во всех трех рассматриваемых образцах (см. табл. 1).

Для сравнения с продуктами ранее изученных извержений также было проанализировано одно мафическое включение — оно обладает несколько более примитивным составом (53.7 мас. % SiO₂, 5 мас. % MgO, 8.8 мас. % FeO) по сравнению с вмещающими андезибазальтами, что характерно для мафических включений вулкана Безымянный [Давыдова и др., 2017].

Продукты данного извержения обогащены медью по сравнению с аналогичными породами, возникшими в ходе более ранних

N⁰	Пористость, об. %	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Cl	S
ОДВ1	63 (58)	66.91	0.97	14.94	4.94	0.14	1.29	3.53	4.32	2.55	0.41	0.14	0.02
ОДВ1		66.63	1.00	14.66	5.23	0.10	1.32	3.82	4.29	2.57	0.38	0.14	b.d.l.
ОДВ1		67.13	1.01	14.73	4.99	0.17	1.29	3.48	4.23	2.56	0.41	0.1	b.d.l.
ОДВ2		67.39	0.97	14.64	4.94	0.17	1.21	3.56	4.08	2.67	0.38	0.17	0.02
ОДВ2	76 (68)	67.1	0.97	14.79	4.95	0.10	1.21	3.35	4.46	2.70	0.38	0.14	0.02
ОДВ2		67.08	0.96	14.66	4.97	0.17	1.24	3.18	4.54	2.79	0.41	0.14	b.d.l.
ОДВ3		65.11	0.91	15.87	5.4	0.14	1.24	4.08	4.42	2.45	0.39	0.16	0.03
ОДВ3	72 (61)	68.42	0.89	14.26	4.58	0.17	1.00	3.06	4.58	2.82	0.21	0.14	0.02
ОДВ3		68.77	0.93	14.29	4.43	0.17	1.02	2.91	4.52	2.75	0.21	0.14	0.02
ОДВ3		68.26	0.90	14.44	4.71	0.17	1.06	3.24	4.31	2.67	0.24	0.12	b.d.l.
ОДВ4	68 (42)	68.11	0.90	14.42	4.85	0.14	1.08	3.21	4.38	2.70	0.21	0.01	b.d.1.
ОДВ4		67.87	1.01	14.50	4.75	0.10	1.20	3.16	4.37	2.79	0.24	0.01	b.d.l.
ОДВ4		67.63	1.01	14.38	4.89	0.17	1.22	3.41	4.35	2.63	0.31	0.01	b.d.l.
ОДВ4		67.69	0.89	14.18	5.02	0.14	1.12	3.49	4.42	2.68	0.38	0.01	b.d.l.
ОДВ4		66.96	1.01	14.64	5.01	0.14	1.08	3.36	4.68	2.71	0.42	0.01	b.d.l.
ОДВ4		67.72	0.89	14.51	4.8	0.14	1.13	3.34	4.46	2.67	0.34	0.01	b.d.l.

Таблица 2. Представительные анализы стекол, в пересчете на 100 мас. % петрогенных оксидов

Примечание. Приведенная пористость получена методом гидростатического взвешивания, в скобках – методом анализа BSE-изображений; b.d.l. – ниже порога обнаружения.

извержений (1956–2019 гг., рис. 4а): для андезитов и андезибазальтов вулкана Безымянный характерно содержание меди в пределах 30–50 г/т [Davydova et al., 2024], тогда как для данного извержения – 65 г/т для бомб пирокластического потока и 80 г/т – для лапилли. Мафическое включение, наоборот, по составу соответствует наименее обогащенным медью включениям вулкана Безымянный (150 г/т vs 140–330 г/т, см. рис. 4б).

Петрография

Пемзовидные лапилли представляют собой сильнопористые порфировые породы (рис. 5), вкрапленники в которых представлены резко преобладающим плагиоклазом, а также орто- и клинопироксеном, титаномагнетитом.

Размер вкрапленников плагиоклаза не превышает 2 мм, большая часть кристаллов обладает характерной осцилляторной зональностью (An₄₇₋₇₀), прерываемой высококальциевыми зонами (An₇₃₋₈₃), часто осложненными многочисленными расплавными включениями, формирующими зоны резорбции мощностью до 200 мкм. Реже встречаются кристаллы с пятнистыми ("patchy-zoned"-плагиоклазы) и основными ядрами (>An₈₀), набитыми расплавными включениями ("sieve-textured"-плагиоклазы). Состав микролитов и кайм вкрапленников плагиоклаза лежит в диапазоне An₅₈₋₆₂.

Пироксены (размером до 0.5 мм) характеризуются простой обратной зональностью, гомогенными ядрами (Mg# = Mg/(Mg+Fe²⁺_{tot}): Opx - 65-69, Cpx - 69-72) и несколько более высокомагнезиальными каймами (Mg# Opx -66-76, Cpx - 72-76).

В качестве акцессорного минерала присутствует апатит, в единичных вкрапленниках присутствуют включения ильменита и Fe-Cu сульфидов диаметром в первые мкм. Интересно, что реликтов амфибола и оливина, встречающихся в эруптивных продуктах извержений последних десятилетий [Shcherbakov et al., 2011; Turner et al., 2013; Давыдова и др., 2017; Davydova et al., 2022], в изученных образцах не встречено.

Основная масса пород стекловатая, с редкими крупными (20-50 мкм) микролитами



Рис. 4. Вариации содержания меди в эруптивных продуктах вулкана Безымянный. Условные обозначения см. рис. 3.

плагиоклаза и титаномагнетита, окруженными стеклом дацитового состава (SiO₂ 66.6–68.7 мас. %, K₂O 2.5–2.8 мас. %). Состав стекла в среднем гомогенен в пределах одного образца (разброс менее 0.5 мас. % SiO₂), но в одном образце встречены единичные более основные (от 65 до 68 мас. % SiO₂) участки стекла. От образца к образцу содержание кремнезема меняется на 1 мас. % SiO₂ (см. табл. 2, рис. 6), без видимой корреляции с пористостью лапилли или их валовым химическим составом.

24

Геотермобарометрия

Температура кристаллизации магмы была оценена с использованием двупироксенового геотермометра [Putirka, 2008, уравнение 26] для давления в 1 кбар, что примерно соответствует глубине приповерхностного очага вулкана Безымянный [Davydova et al., 2022]. При изменении давления на 1 кбар оценки температуры меняются менее, чем на 5°С, что позволяет пренебречь более детальными определениями. Для расчетов использовались анализы сростков орто- и клинопироксена, прошедшие тест на равновесие (K_D (Fe-Mg)^{Cpx-Opx} = (X_{Fe}^{Cpx} / $X_{Mg}^{Cpx})/(X_{Fe}^{Opx}/X_{Mg}^{Opx}) = 1.09 \pm 0.14$, [Putirka et al., 2008]). Оценки температуры кристаллизации центральных частей вкрапленников лежат в диапазоне 940-960°С, тогда как оцененные

температуры кристаллизации кайм соответствуют 980°С.

Давление последнего равновесия перед извержением, грубо отвечающее глубине фрагментации магмы, оценивалось с помощью барометра [Albarede, 1992; Putirka, 2008], основанного на составе матричного стекла ("silica-activity barometer"). Для расчетов использовалась оценки температуры кайм пироксенов (980°С). Полученные значения лежат в диапазоне 0.5–0.6 кбар.

Пористость

Образцы, для которых определялась пористость, характеризуются высокими ее значениями, достигающими 78%. При этом, значения пористости, определявшиеся методом компьютерной рентгеновской томографии (табл. 3), заметно ниже пористости, посчитанной методом гидростатического взвешивания в воде (см. табл. 3), что может быть связано в первую очередь с ограничением разрешающей способности томографа, а во вторую – с тем, что периферийная часть образца, не попадающая в область съемки томографа, может характеризоваться большей пористостью, нежели его центральная часть.

Спутниковые данные

На основе данных спутникового зондирования (алгоритм VIIRS Nightfire) можно достаточно



Рис. 5. Общий вид эруптивных продуктов, фото в отраженных электронах (а, б) и основная масса изученных образцов, фото в отраженных электронах (в, г).

a – образец ОДВ-2 (лапилли); б – образец VK2302 (внутренняя часть крупного ювенильного блока из пирокластического потока); в – образец ОДВ-2 (лапилли); г – образец VK2302 (внутренняя часть крупного ювенильного блока).

точно выделить периоды закрытой и открытой вулканической системы. Используемый алгоритм выделяет только интенсивную тепловую эмиссию, характерную для горячих экструзий или лавовых потоков. На графике (рис. 7) показаны значения излучаемой мощности вулкана Безымянный за период 2012–2023 гг. Черные вертикальные линии соответствуют датам извержения вулкана (данные – каталог KVERT, http://www. kscnet.ru/ivs/kvert/volc?name=Bezymianny). Также на графике представлена кумулятивная энергия вулканического теплового излучения в Джоулях (красная кривая). Периоды, когда наблюдалась открытая вулканическая система, отмечены зелеными областями.

Наиболее интересны несколько периодов. После эксплозивного извержения 16 июня

2017 г. интенсивная тепловая эмиссия регистрировалась до октября 2018 г., что может соответствовать горячим экструзивным блокам и излиянию лавовых потоков. Такая же динамика наблюдалась и после извержения 20 января 2019 г. Весь год система была открытой, а в декабре 2019 г. произошло резкое увеличение тепловой эмиссии, при этом эксплозивного извержения не произошло. Для периода активности вулкана в 2022-2023 гг. наблюдается увеличение средних значений мощности тепловой эмиссии вулкана. На изменение режима эруптивной деятельности вулкана в этот период указывают и данные сейсмических наблюдений [Сенюков и др., 2023]. Вероятно, это может быть связано с изменениями в строении магматической системы вулкана Безымянный.

	Метод гидро взвеши	статического ивания	Компьютерная рентгеновская микротомография					
Образец	Объем образца, мм ³	Объемная пористость	Объем цилиндра, для которого производился расчет, мм ³	Линейный размер вокселя, мм	Объемная пористость, %			
OD5	20230	63	3583	0.081580	25.2			
OD6	17630	72	2771	0.078152	35.4			
OD7	19340	78	3250	0.073504	46.7			
OD8	29300	72	4199	0.081487	38.4			
OD9	24190	63	2567	0.088559	44.2			

Таблица 3. Пористость образцов лапилли, посчитанная методами компьютерной рентгеновской томографии и гидростатического взвешивания

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Магматическая система вулкана Безымянный

В ходе ряда петрологических [Shcherbakov et al., 2021; Давыдова и др., 2017, 2018; Davydova et al., 2022, 2024], геохимических [Turner et al., 2013] и геофизических [Koulakov et al., 2021; Coppola et al., 2021] работ было показано, что современные извержения вулкана Безымянный преимущественно инициализируются поступлением магмы, фракционирующей из примитивных базальтовым магм в андезибазальтовые в системе нижне-среднекоровых очагов (3-9 кбар), в приповерхностный магматический очаг (порядка 1 кбар). За счет регулярной подпитки на протяжении современного эруптивного цикла (с 1955-1956 гг. по наши дни) состав магм приповерхностного очага сменился с отвечающего роговообманковым дацитам на отвечающий двупироксеновым андезибазальтам [Turner et al., 2013; Давыдова и др., 2017; Гирина и др., 2020]. Содержание петрогенных элементов в питающих магмах и магмах приповерхностного очага отличается незначительно (первые мас. % SiO₂), однако значительно отличается содержание летучих компонентов (не менее 5 мас. % Н₂О в питающих магмах, порядка 1.5 мас. % в магмах приповерхностного очага [Shcherbakov et al., 2021; Давыдова и др., 2017]). Подъем глубинной магмы в приповерхностный очаг и сопутствующая потеря летучих приводит к ряду последствий для обоих компонентов смешения.

Минералы, кристаллизовавшиеся на глубинном уровне (3-9 кбар, преимущественно

плагиоклаз-амфиболовая ассоциация), при подъеме испытывают декомпрессионное плавление и последующую перекристаллизацию, что приводит к возникновению реакционных (опацитовых кайм) у амфибола и характерной (в т.ч. пятнистой) зональности у плагиоклаза [Давыдова и др., 2017]. Поднимающаяся глубинная магма при поступлении в приповерхностный очаг фрагментируется, отдельные фрагменты (далее – мафические включения) интенсивно (первые минуты-часы) теряют летучие компоненты за счет диффузионного переуравновешивания с окружающим, бедным летучими компонентами, расплавом магмы приповерхностного очага. Потеря летучих приводит к быстрой кристаллизации мафических включений, вплоть до достижения равновесия с магмой приповерхностного очага [Davydova et al., 2024]. При долгом нахождении в приповерхностном очаге часть включений разрушается, что приводит к появлению характерных реликтовых кристаллов плагиоклаза и амфибола в магмах приповерхностного очага. Таким образом, наличие как следов разрушения мафических включений (наличие реликтовых ядер вкрапленников плагиоклаза с пятнистой зональностью), так и сохранных мафических включений в пирокластических отложениях изученного извержения, соответствуют отмечаемым ранее для пород вулкана Безымянный признакам, свидетельствующим о подпитке из нижних уровней магматической системы [Shcherbakov et al., 2011, Turner et al., 2013; Давыдова и др., 2017; Davydova et al., 2022].



Рис. 6. Состав вулканических стекол изученных образцов. Условные обозначения см. рис. 3.

Серыми кружками обозначены средние составы стекол извержений 2006-2017 гг. [Davydova et al., 2022], в случае отсутствия планки погрешности – ее величина меньше размера символа.

Добавление летучих компонентов в маг- обогащенных более высокотемпературным стичному плавлению уже сформировавших- зорбции [Давыдова и др., 2017, 2018]. Таким ся кристаллов и последующему росту кайм, образом, нормальная (для пироксенов) или

му приповерхностного очага приводит к ча- миналом и зачастую осложненных зонами ре-



Рис. 7. График распределения тепловой эмиссии на вулкане Безымянный за период 2012–2023 гг., по данным спутникового мониторинга VIIRS Nightfire.

Красная линия – кумулятивная излучаемая энергия, в Дж. По вспомогательной оси – у логарифм излучаемой вулканической мощности, в МВт. Черные вертикальные линии – даты извержения вулкана. Зеленые области – периоды открытой вулканической системы.



Рис. 8. Сравнение графика распределения тепловой эмиссии на вулкане Безымянный за период 2012–2023 гг., по данным спутникового мониторинга VIIRS Nightfire с ранее опубликованными данными алгоритма MIROVA [Coppola et al., 2021] по распределению тепловой эмиссии до перерыва в эксплозивной деятельности в период 2012–2016 гг. Черные вертикальные линии – даты извержения вулкана.

осцилляторная (для плагиоклаза) зональность вкрапленников, формирующаяся при кристаллизации в конвектирующем магматическом очаге [Shcherbakov et al., 2021], прерывается

зонами плавления, характеризующими эпизод поступления в приповерхностный очаг новых порций глубинной магмы. В продуктах извержения 7 апреля 2023 г. сохраняется этот паттерн, что также свидетельствует о неизменившемся механизме инициации извержений вулкана.

Внедрение глубинной магмы и добавление флюидных компонентов приводит к возрастанию давления в приповерхностном очаге. При достижении критического значения, происходит выдавливание магмы в магматический канал, ее фрагментация и последующее извержение. Глубина фрагментации магмы "фиксируется" составом вулканического стекла, соответствующего составу последнего равновесия расплава с кристаллизующимися микролитами. Зная, что скрытая теплота кристаллизации обеспечивает несколько повышенную относительно ядер вкрапленников температуру кристаллизации микролитов [Shcherbakov et al., 2011], и что формирование микролитов происходит непосредственно при подъеме магмы в магматическом канале, мы предполагаем, что температура расплава при фрагментации будет не ниже температуры кристаллизации микролитов. Таким образом, мы может грубо оценить давление, соответствующее глубине начала фрагментации магмы при извержении 7 апреля 2023 г. (0.5-0.6 кбар).

Эруптивные продукты и их эволюция относительно предыдущих извержений

Пористость лапилли. Пористость лапилли была оценена тремя независимыми методами методом компьютерной рентгеновской томографии, методом гидростатического взвешивания, анализом панорамных BSE-изображений с помощью программы ImageJ. Наибольшие значения пористости были получены при взвешивании образцов в воде (63-76 об. %), наименьшие - с помощью метода компьютерной томографии (25-46 об. %). Анализ крупномасштабных BSE-изображений позволяет выявить вариации пористости в пределах одного образца – до 20 об. %, в целом, оценки лежат в диапазоне 40-70 об. %. Также ВЅЕ-изображения позволяют оценить размер пор, часть из которых значительно меньше минимального размера, необходимого для корректного использования метода рентгеновской томографии. С учетом особенностей изготовления шлифов (для пористых образцов выбирается наиболее прочная и, соответственно, наименее пористая часть) очевидно, что измерение пористости подобных

образцов путем гидростатического взвешивания позволяет получить наиболее корректные результаты (63–76 об. % для лапилли извержения 7 апреля 2023 г.).

Оценки пористости лапилли методом анализа BSE-изображений перекрываются с оценками пористости части эруптивных продуктов 20 декабря 2017 г., полученных аналогичным методом [Davydova et al., 2022]. Данные продукты - кристобалит- и тридимит-содержащие породы, формирующиеся при извержении магмы, хранящейся в магматическом канале под лавовой пробкой [Davydova et al., 2022], - и, соответственно, первые порции магмы, попавшие на поверхность при извержении 20 декабря 2017 г. Сравнение валового химического и минерального состава лапилли с вышеуказанными эруптивными продуктами извержения декабря 2017 г. позволило отследить изменения в магматической системе вулкана.

Состав эруптивных продуктов. Продукты извержения апреля 2017 г. представлены андезибазальтами, составы которых, в целом, закономерно продолжают тренд эволюции составов пород современного эруптивного цикла, отмеченный ранее в ряде работ [Малышев, 2000; Turner et al., 2013]. Однако, образцы, отобранные из ювенильных блоков в пирокластическом потоке, по своему валовому составу практически идентичны друг другу и ложатся в область наиболее основных составов пород вулкана Безымянный, тогда как лапилли демонстрируют более широкий диапазон составов (55.5-57 мас. % SiO₂). Подобные вариации химического состава отмечаются и для некоторых других извержений (например, 14-15 октября 2007 г. или 20 декабря 2017 г., см. рис. 3).

Для извержения 20 декабря 2017 г. было показано, что подобный широкий диапазон составов формируется за счет выноса на поверхность эволюционировавшей магмы, сформировавшейся в верхней части магматического очага или даже магматического канала во время относительно долгого перерыва между извержениями вулкана в 2012–2016 гг., тогда как большая часть вещества, отражающая состав магмы в приповерхностном очаге и слагающая пирокластические потоки, довольно однородна по химическому составу и отвечает наиболее примитивной части диапазона [Davydova et al., 2022]. Подобные относительно кислые разновидности эруптивных продуктов отмечались для всех изученных извержений после перерыва вплоть до 2020 г. (2016–2020 гг.) [Mania et al., 2019; Koulakov et al., 2021; Davydova et al., 2022, неопубликованные данные].

Пирокластические потоки, сформировавшиеся в результате извержений 2022 и 2023 гг., подобного относительно кислого материала не содержат, согласно полевым наблюдениям авторов. Ранние порции магмы, попавшие на поверхность в процессе извержения 7 апреля 2023 г. в виде тефры – пемзовидные лапилли – хоть и демонстрируют некоторое разнообразие составов, не показывают их значительного смещения в кремнекислую область. Вышесказанное позволяет предполагать, что серия последовательных извержений 2017-2020 гг. привела к эффективному удалению из верхней части магматической системы большей части магмы, эволюционировавшей в период покоя (2012-2016 гг.). В настоящее момент магматическая система вернулась к состоянию, аналогичному состоянию до 2012 г., с относительно гомогенным приповерхностным магматическим очагом, магма в котором по составу соответствует андезибазальтам.

Возрастание средних значений мощности тепловой эмиссии вулкана (см. рис. 7) и возвращение картины распределения графиков мощности тепловой эмиссии в состояние, подобное наблюдаемому в период 2000—2012 гг. (рис. 8), так же является косвенным свидетельством перехода магматической системы через "переходный период", вызванный перерывом в эксплозивной активности.

Вариации содержания меди в эруптивных продуктах. Для пород современного эруптивного цикла вулкана Безымянный ранее отмечалось аномальное обогащение медью мафических включений (150–330 г/т) на фоне вмещающих андезитов и андезибазальтов, содержащих относительно низкие (30–50 г/т) для пород подобного состава концентрации Си [Давыдова и др., 2017; Davydova et al., 2024]. Рассматриваемые в данной работе андезибазальты характеризируются повышенным содержанием меди (65–80 г/т) относительно андезитов и андезибазальтов извержений последних двух десятилетий (30–50 г/т, см. рис. 4а, [Davydova et al., 2024]) и всего современного эруптивного цикла (18–63 г/т, [Turner et al., 2013]). Лапилли так же характеризуются повышенными концентрациями Cu (80 г/т) относительно бомб из пирокластического потока (65 г/т). Мафическое включение – наоборот, по составу ложится в область наименее обогащенных медью составов мафических включений вулкана Безымянный (150 г/т для включений 2023 г. и 100–330 г/т для включений 2007–2017 гг., [Davydova et al., 2024]) (см. рис. 4б). Ранее нами был предложен механизм обеднения андезибазальтов вулкана Безымянный Cu за счет ее перераспределения в мафические включения в магматическом очаге [Davydova et al., 2024].

Относительно слабое обогащение медью мафического включения и сохранение повышенных концентраций меди в андезибазальтах может отвечать небольшому временному интервалу между поступлением магмы из нижних уровней системы в приповерхностный очаг и извержением. Различия между составом лапилли и бомб могут быть объяснены как результат формирования их из магмы, хранившейся в разных частях магматического очага – лапилли, извергшиеся одними из первых, вероятно, сформировались из магмы, находившейся в верхних частях очага или непосредственно в магматическом канале, и испытавшие минимальное взаимодействие с магмой мафических включений. Однако также наблюдаемые отличия могут свидетельствовать о значительных изменениях в магматических процессах, приводящих к извержениям вулкана Безымянный и контролирующих поведение меди в его магматической системе, и требуют более детального изучения.

выводы

Эруптивные продукты извержения 7 апреля 2023 г. относятся к умеренно-калиевым андезибазальтам. Составы пород из ювенильных блоков и бомб пирокластических потоков ложатся в область наиболее примитивных пород современного эруптивного цикла. Лапилли демонстрируют более широкий диапазон составов и сформировались из магмы, хранившейся непосредственно перед извержением в верхней части магматического очага. Температура магмы непосредственно перед извержением достигала 980°С.

Условия формирования и особенности минерального состава пород свидетельствуют об эффективном удалении из верхней части приповерхностного очага вулкана Безымянный большей части магмы, эволюционировавшей в сторону более кислых составов за время перерыва в извержениях в 2012–2016 гг., и возвращении приповерхностного очага к состоянию, наиболее близко отвечающему состоянию в период 2007–2012 гг.

Интересным отличием от продуктов предыдущих извержений является повышенное относительно них содержание меди в андезибазальтах, однако природа данного явления требует более детальных исследований.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность членам отряда "Эруптивный" Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, принимавшим участие в полевых работах в апреле 2023 г., в т.ч. И.А. Нуждаеву и В.И. Фролову, предоставившим фотоматериалы; С.З. Смирнову и Т.Ю. Тиминой, предоставившим составы вулканического пепла; Д.С. Татариновой и М.Д. Щеклеиной за помощь в проведении полевых работ в августе 2023 г., И. Абкадырову за помощь в транспортировке образцов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ (грант № 22-77-00016).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гирина О.А., Горбач Н.В., Давыдова В.О., Мельников Д.В., Маневич Т.М., Маневич А.Г., Демянчук Ю.В. Эксплозивное извержение вулкана Безымянный 15 марта 2019 г. и его продукты // Вулканология и сейсмология. 2020. № 6. С. 50-66.

Гирина О.А., Лупян Е.А, Маневич А.Г., Мельников Д.В., Нуждаев А.А., Сорокин А.А., Романова И.М., Крамарева Л.С., Уваров И.А., Королев С.П., Демянчук Ю.В., Цветков В.А. Дистанционный мониторинг

ВУЛКАНОЛОГИЯ И СЕЙСМОЛОГИЯ № 5 2024

эксплозивных извержений вулкана Безымянный в 2023 г. // Материалы 21-й Международной конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса", XXI.G.92, Москва, 13–17 ноября 2023 г. М.: ИКИ РАН, 2023.

Давыдова В.О., Щербаков В.Д., Плечов П.Ю. Оценки времени смешения магм в системе вулкана Безымянный (Камчатка) по данным диффузионной хронометрии // Вестник МГУ. Серия 4. Геология. 2018. №. 4. С. 52–58.

Давыдова В.О., Щербаков В.Д., Плечов П.Ю., Перепелов А.Б. Характеристика мафических включений в продуктах современных извержений вулкана Безымянный 2006–2012 гг. // Петрология. 2017. Т. 25. № 6. С. 609–634.

Малышев А.И. Жизнь вулкана. Екатеринбург: Издво УрО РАН, 2000. 260 с.

Мельников Д.В., Жижин М.Н., Трифонов Г.М., Пойda А.А. Динамика извержения вулкана Сноу (о. Чирпой, Курильские острова) в 2012–2017 гг.: результаты применения алгоритма VIIRS Nightfire // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 3. С. 69–79.

Сенюков С.Л., Нуждина И.Н., Дрознина С.Я., Кожевникова Т.Ю., Назарова З.А., Соболевская О.В. Особенности сейсмичности вулкана Безымянный в 2022–2023 гг. // Труды Девятой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием 24–30 сентября 2023 г. "Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов". Петропавловск-Камчатский, 2023. С. 183–187.

Albarede F. How deep do common basaltic magmas form and differentiate? // J. of Geophys. Res.: Solid Earth. 1992. V. 97. № B7. P. 10997–11009.

Coppola D., Laiolo M., Massimetti F., Hainzl S., Shevchenko A., Mania R., Shapiro N., Walter T.R. Thermal remote sensing reveals communication between volcanoes of the Klyuchevskoy Volcanic Group // Scientific Reports. 2021. V. 11. № 1. P. 13090.

Davydova V.O., Shcherbakov V.D., Plechov P.Y., Koulakov I.Y. Petrological evidence of rapid evolution of the magma plumbing system of Bezymianny volcano in Kamchatka before the December 20th, 2017 eruption // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2022. V. 421. P. 107422.

Davydova V.O., Shcherbakov V.D., Plechov P.Y., Yapaskurt V.O., Scherbakov Yu.D., Perepelov A.B, Brianskii N.V, Antipin V.S. Copper redistribution from shallow oxidized magmas to mafic enclaves. Insight from anomalously Cuenriched enclaves from Bezymianny volcano, Kamchatka // Lithos. 2024. https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4661224

Elvidge C., Zhizhin M., Hsu F-C., Baugh K. VIIRS Nightfire: Satellite Pyrometry at Night // Remote Sensing. 2013. V. 5. \mathbb{N}_{2} 9. P. 4423–4449. *Girina O.A.* Chronology of Bezymianny volcano activity, 1956–2010 //J. of Volcanol. Geotherm. Res. 2013. V. 263. P. 22–41.

Jarosewich E., Nelen J.A., Norberg J.A. Reference samples for electron microprobe analysis // Geostandards Newsletter. 1980. V. 4. № 1. P. 43–47.

Koulakov I., Plechov P., Mania R., Walter T.R., Smirnov S.Z., Abkadyrov I., Jakovlev A., Davydova V., Senyukov S., Bushenkova N., Novgorodova A., Stupina T., Droznina S.Ya. Anatomy of the Bezymianny volcano merely before an explosive eruption on 20.12.2017 // Scientific reports. 2021. V. 11. № 1. P. 1–12.

Mueller S., Scheu B., Kueppers U., Spieler., Richard D., Dingwell D. The porosity of pyroclasts as an indicator of volcanic explosivity // J. of Volcanol. Geotherm. Res. 2011. V. 203. P. 168–174.

Plechov P., Blundy J., Nekrylov N., Melekhova E., Shcherbakov V., Tikhonova M.S. Petrology and volatile content of magmas erupted from Tolbachik Volcano, Kamchatka, 2012–2013 // J. of Volcanol. Geotherm. Res. 2015. V. 307. P. 182–199. *Putirka K.D.* Thermometers and barometers for volcanic systems // Rev. Mineral. Geochem. 2008. V. 69. № 1. P. 61–120.

Shcherbakov V.D., Plechov P.Y., Izbekov P.E., Shipman J.S. Plagioclase zoning as an indicator of magma processes at Bezymianny Volcano, Kamchatka // Contrib. Mineral. Petrol. 2011. V. 162. P. 83–99.

Trifonov G., Zhizhin M., Melnikov D., Poyda A. VIIRS Nightfire remote sensing volcanoes // Procedia computer science. 2017. V. 119. P. 307–314.

Turner S.J., Izbekov P.E., Langmuir C. The magma plumbing system of Bezymianny Volcano: Insights from a 54 year time series of trace element whole-rock geochemistry and amphibole compositions // J. Volcanol. Geothermal. Res. 2013. V. 263. P. 108–121.

Zhizhin M., Matveev A., Ghosh T., Hsu F-C., Howells M., Elvidge C. Measuring Gas Flaring in Russia with Multispectral VIIRS Nightfire // Remote Sensing. 2021. V. 13. № 16. P. 3078.

ERUPTIVE PRODUCTS FROM THE BEZYMIANNY VOLCANO ERUPTION ON APRIL 7, 2023

V. O. Davydova^{1, *}, R. A. Kuznetsov², O. V. Dirksen², D. V. Melnikov², A. B. Ermolinsky¹, V. O. Yapaskurt¹

¹Geological Faculty, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, Moscow, 119991 Russia ²Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Piipa bulvar, 9, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006 Russia *e-mail: vestadav@gmail.com

We have obtained the first data on the chemical composition of the eruptive materials from the explosive eruption of Bezymianny volcano on April 7, 2023. Our unique collection includes freshly sampled pumice lapilli from the eruption and juvenile blocks from pyroclastic flows. We have identified interesting patterns in both macro components and specific chalcophile elements, such as copper. The rocks we studied belong to medium-K two-pyroxene basaltic andesite (55.5-57 wt. % SiO₂), with mafic enclaves characterized by a slightly more primitive composition (53.7 wt. % SiO₂). According to mineral geothermometry data, the phenocrysts of basaltic andesite crystallized at temperatures in the range from 940 to 960°C, while the formation of phenocryst rims and microlites occurred at 980°C, which corresponds to conditions immediately before the eruption. The composition of volcanic glass allows us to estimate the pressure at which the magma reached the last equilibrium with crystallizing phases before eruption (0.5-0.6 kbar). Based on these findings, we have formulated hypotheses about the potential evolution of the shallow magma chamber of Bezymianny volcano during the period from 2017 to 2023.

Keywords: Bezymianny volcano, andesite, arc volcanoes