

УДК 548.4: 549.5

DOI: 10.35597/2313-545X-2023-9-1-4

УСЛОВИЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ПЛАГИОКЛАЗОВ В ЭФФУЗИВНЫХ КОМПЛЕКСАХ ОСТРОВА СУЛАВЕСИ, ТИХИЙ ОКЕАН**А.В. Котляров¹, Н.В. Дмитриева¹, В.А. Симонов¹, И.Ю. Сафонова^{1,2},
Н.С. Карманов¹, И.Р. Низаметдинов¹**¹ *Институт геологии и минералогии СО РАН, пр. Академика Коптюга 3,
г. Новосибирск, 630090 Россия; kotlyarov@igm.nsc.ru*² *Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 630090,
Новосибирск, ул. Пирогова, 2*

Статья поступила в редакцию 12.03.2023 г., принята к печати 14.03.2023 г.

CRYSTALLIZATION CONDITIONS OF PLAGIOCLASE IN VOLCANIC COMPLEXES OF SULAWESI ISLAND, PACIFIC OCEAN**A.V. Kotlyarov¹, N.V. Dmitrieva¹, V.A. Simonov¹, I.Yu. Safonova^{1,2},
N.S. Karmanov¹, I.R. Nizametdinov¹**¹ *Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS, pr. Akademika Koptyuga 3,
Novosibirsk, 630090 Russia; kotlyarov@igm.nsc.ru*² *Novosibirsk State University, 2 Pirogov St, Novosibirsk 630090, Russia*

Received 12.03.2023, accepted 14.03.2023

Аннотация. Минералогические и термобарогеохимические исследования позволили выяснить условия кристаллизации плагиоклазов в эффузивных комплексах острова Сулавеси (Тихий океан). Судя по составу плагиоклазов, в минералообразующих процессах участвовали три типа расплавов, из которых сформировались вкрапленники в базальтах, андезитах и дацитах, а также кристаллиты в основной массе андезитов и дацитов. Анализ стекол прогретых расплавных включений в плагиоклазе свидетельствует о существовании двух контрастных типов (базитовых и кислых) магм при кристаллизации вкрапленников. На заключительных этапах вулканических процессов плагиоклаз в матрице андезитов и дацитов формировался из других кислых расплавов с максимальным содержанием щелочей. Присутствие первичных сингенетических расплавных и флюидных включений во вкрапленниках плагиоклаза говорит о процессах фазовой сепарации кислых магм, приведшей к кристаллизации разных по составу фенокристаллов полевых шпатов при формировании дацитов. Расчетное моделирование в программе (Putirka, 2008) на основе состава плагиоклазов, стекол прогретых включений и стекол из основной массы позволило определить температуры кристаллизации вкрапленников полевых шпатов из базальтов (1160–1120 °С), андезитов (930–890 °С) и дацитов (1035–970 °С), а также температуры образования микрокристалликов из основной массы андезитов (875–810 °С) и дацитов (900–865 °С).

Ключевые слова: условия кристаллизации, плагиоклазы, расплавные включения, остров Сулавеси, Тихий океан.

Abstract. Mineralogical and thermobarogeochemical studies allowed us to reveal the crystallization conditions of plagioclase in volcanic complexes of Sulawesi Island (Pacific Ocean). The composition of plagioclase indicates the presence of three types of melts, which were involved in the formation of plagioclase phenocrysts in basalts, andesites and dacites, as well as crystallites in the groundmass of andesites and dacites. The analysis of glasses of heated melt inclusions in plagioclase indicates the involvement of two contrasting melts (mafic and felsic) in crystallization of phenocrysts. At the final stages of the volcanic process, plagioclase in matrix of andesites and dacites formed from another felsic melts with maximum alkali content. The presence of primary syngenetic melt and fluid inclusions in plagioclase phenocrysts indicates the phase separation of felsic magmas, which led to the crystallization of feldspar phenocrysts of different composition during the formation of dacites. Computational modeling in a program of (Putirka, 2008) based on the composition of plagioclases, glasses of heated inclusions and glasses from the groundmass allowed us to estimate the

crystallization temperatures of feldspar phenocrysts in basalt (1160–1120 °C), andesite (930–890 °C) and dacite (1035–970 °C), as well as the feldspar microcrystals in the groundmass of andesite (875–810 °C) and dacite (900–865 °C).

Keywords: crystallization conditions, plagioclase, melt inclusions, Sulawesi Island, Pacific Ocean.

Введение

Исследования магматических систем в современных вулканических областях важны для выяснения условий образования древних эффузивных ассоциаций, что практически невозможно сделать без сравнительного анализа с данными по эталонным вулканогенным объектам, формирующимся фактически в настоящее время. Особый интерес представляют эффузивные комплексы современных островных дуг, т. к. формирование многих месторождений связано с развитием древних систем островная дуга – задуговой бассейн. Изучение современных островодужных вулканических комплексов также важно для определения параметров надсубдукционных магматических систем, необходимых в качестве эталонных данных при изучении древних эффузивных ассоциаций в складчатых областях.

При исследовании эффузивных комплексов, слагающих островные дуги, не всегда удается выяснить все особенности развития магматических систем с помощью классических петролого-геохимических методов. Большую помощь в решении генетических вопросов может оказать использование минералогических и термобарогеохимических методик изучения первичных магматогенных минералов и расплавных и флюидных включений в них. Особое значение имеют «сквозные» минералы с расплавными включениями из различных типов пород, слагающих единую вулканогенную ассоциацию. Изучение таких минералов позволяет наиболее полно рассмотреть условия формирования вулканических структур. Подобный подход использован нами при исследовании эффузивных комплексов острова Сулавеси (Тихий океан).

Методы исследования

Условия кристаллизации установлены для плагиоклазов из базальтов и дацитов вулкана Локон, а также андезитов кальдеры Тондоно, собранных И.Ю. Сафоновой в северо-восточной части острова. Образцы исследованы в Институте геологии и минералогии СО РАН (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск), а также в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (г. Новосибирск). Эксперименты по гомогенизации расплавных включений при высоких температурах проводились в микротермокамере с инертной средой конструкции (Соболев, Слуцкий, 1984) с применением методик (Симонов, 1993; Sobolev, Danyushevsky, 1994). Для сравнения привлечены опубликованные данные по эффузивам соседнего вулкана Сопутан.

Для определения состава расплава анализировались гомогенные стекла, образовавшиеся при полном переплавлении (и последующей закалке) силикатного содержимого первичных расплавных включений во вкрапленниках в ходе термометрических экспериментов в микротермокамере. После гомогенизации силикатного содержимого и закалки включения могут состоять полностью из гомогенного стекла или содержать газовый пузырек.

Вкрапленники плагиоклаза анализировались микрорентгеноспектральным методом с помощью микроанализатора JEOL JXA-8100 SuperProbe (Королюк и др., 2008). Состав гомогенных стекол прогретых включений и плагиоклазов около включений, а также состав микрокристаллов плагиоклаза и природного стекла в основной массе определен на сканирующем электронном микроскопе MIRA 3 LMU (Tescan Orsay Holding) с системой микроанализа Aztec Energy XMax 80 (Oxford Instruments Nanoanalysis Ltd) при ускоряющем напряжении

Для цитирования: Котляров А.В., Дмитриева Н.В., Симонов В.А., Сафонова И.Ю., Карманов Н.С., Низаметдинов И.Р. Условия кристаллизации плагиоклазов в эффузивных комплексах острова Сулавеси, Тихий океан. Минералогия, 9(1), 60–78. DOI: 10.35597/2313-545X-2023-9-1-4

For citation: Kotlyarov A.V., Dmitrieva N.V., Simonov V.A., Safonova I.Yu., Karmanov N.S., Nizametdinov I.R. Crystallization conditions of plagioclase in volcanic complexes of Sulawesi island, Pacific Ocean. Mineralogy, 9(1), 60–78. DOI: 10.35597/2313-545X-2023-9-1-4.

20 кВ, токе электронного пучка 1.5 нА и живом времени набора спектров 20 секунд. В качестве образцов сравнения использованы минералы и чистые элементы из блока MAC-55 (Microanalysis Consultant Ltd.). При данных условиях анализа случайная погрешность определения основных компонентов ($C \geq 10$ мас. %) не превышает 1 отн. %. Погрешность определения компонентов с концентрациями 1–10 мас. % составляет 2–6 отн. % и не превышает 10 отн. %. При концентрациях вблизи предела обнаружения (0.2–0.3 мас. %) погрешность может достигать величины 20 отн. % и более (Лаврентьев и др., 2015). Для исключения влияния на качество анализа микрорельефа образца, а также для снижения дрейфа интенсивности характеристического рентгеновского излучения под воздействием электронного пучка анализ выполнялся в режиме малого раstra с размером сканируемой площади не менее 3×3 мкм.

Для определения роли летучих компонентов в расплаве стекла прогретых расплавных включений анализировались методом КР спектроскопии на приборе Horiba LabRam HR800 (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск). Для уточнения и верификации полученных данных по количеству H_2O в стеклах использовалось сочетание КР спектроскопии и микрорентгеноспектрального анализа, согласно методике, описанной в работе (Котов и др., 2021).

Температуры кристаллизации плагиоклаза были рассчитаны в программе (Putirka, 2008) с использованием составов вкрапленников и экспериментально полученных гомогенных стекол находящихся в них расплавных включений, а также на основе данных по микрокристаллам плагиоклаза и располагающимся между ними природным стеклом в основной массе андезита. *PT*-параметр кристаллизации плагиоклазов из базальтов вулкана Локон также рассчитаны в программе COMAGMAT (Ariskin, Barmina, 2004).

Геолого-петрографические особенности эффузивных комплексов

Остров Сулавеси входит в состав дуги Северного Сулавеси на юго-западе Тихого океана в зоне сочленения трех литосферных плит: Евразийской – на западе, Тихоокеанской – на востоке и Индо-Австралийской – на юго-востоке (рис. 1). Южная и центральная части острова сложены кайнозойскими вулканидами, которые к востоку сменяются офиолитами и метаморфическими, преимуще-

ственно кислыми, породами. В северной части острова развиты миоцен-плиоценовые эффузивные комплексы. На северо-восточном окончании острова находятся современные активные вулканические постройки (рис. 1), цепочка которых прослеживается до южного окончания Филиппинской дуги (Hall, 2002; White et al., 2017; Zhang et al., 2022).

Кальдера Тондоно представляет собой четвертичную вулканотектоническую структуру. Она является самой крупной кальдерой на севере острова: ее размеры составляют примерно 20×30 км. Посткальдерная стадия связана с формированием голоценовых андезит-базальтовых стратовулканов (Локон, Сопутан), расположенных на северной и южной границах кальдеры соответственно. Вулканический комплекс Локон включает в себя четыре вершины и активный кратер размером 150×250 м, расположенный в седловине между вершинами Локон и Эмпунг. Начиная с 1829 г., в кратере происходят извержения, сопровождающиеся выбросами тефры, ростом лавовых куполов и пирокластическими потоками (Global..., 2022). Вулкан Сопутан, расположенный на южной границе кальдеры Тондоно, является одним из самых активных. Последние десять лет его вулканическая деятельность сопровождалась взрывами и выбросами пепла, а также пирокластическими потоками. Крупное извержение с потоками лав произошло в марте 2015 г. Активными были кратер на вершине вулкана, где формируется новый лавовый купол, и жерло на его северо-восточном склоне (Global..., 2022).

Плагиоклазы в базальтах, андезитах и дацитах из вулканотектонической структуры, включающей кальдеру Тондоно, вулканы Локон и Сопутан, представлены вкрапленниками (рис. 2) и микрокристаллитами (рис. 3) в основной микрозернистой массе. Для базальтов характерны вкрапленники плагиоклаза (рис. 2а), располагающиеся совместно с фенокристаллами клинопироксена в неравномернозернистой микродолеритовой основной массе, в которой преобладают микрокристаллиты плагиоклаза и клинопироксена при незначительной роли стекла. Андезиты содержат два типа вкрапленников, представленных сростками плагиоклаза и пироксена (рис. 2б), а также фенокристаллами плагиоклаза. Основная микрозернистая масса состоит из свежего стекла и микрокристаллитов плагиоклаза (рис. 3а). Структура дацитов сходна с таковой андезитов: сростки минералов (рис. 2в) и вкрапленники располагаются в основной микрозернистой массе со стеклом и кристаллитами плагиоклаза

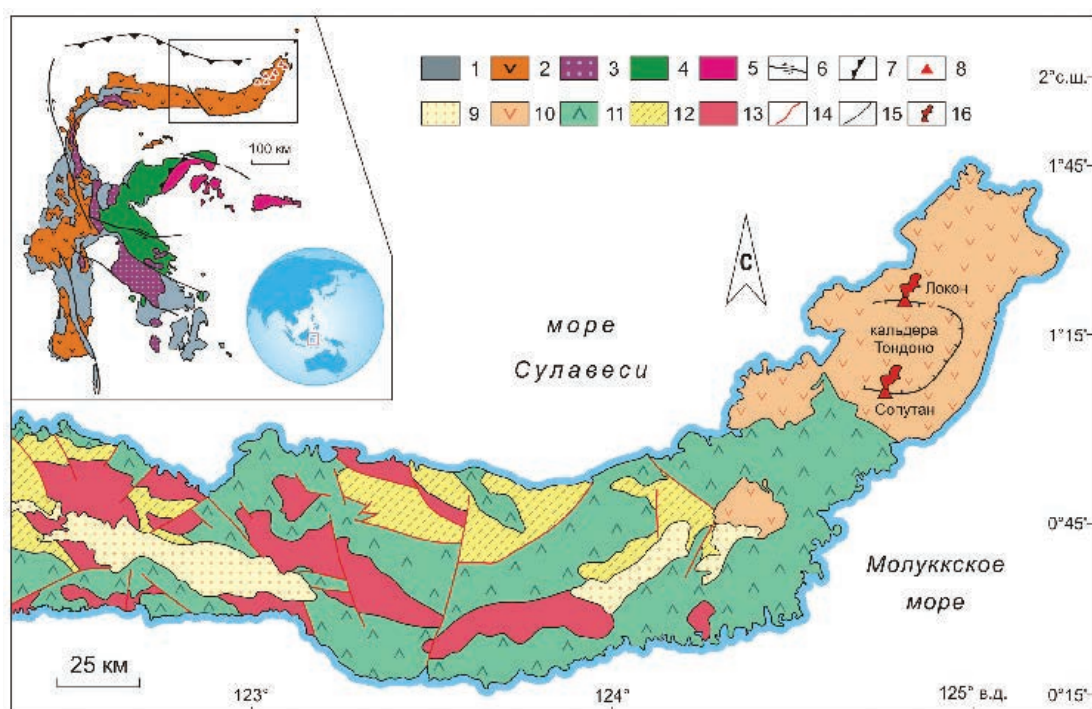


Рис. 1. Схема геологического строения северо-восточной части острова Сулавеси, по (Maulana et al., 2016; Advokaat et al., 2017; Zhang et al., 2022).

1 – четвертичные и неогеновые осадочные отложения; 2 – кайнозойские вулканические и плутонические породы; 3 – метаморфические породы; 4 – офиолитовые комплексы; 5 – континентальный фундамент; 6 – сдвиги; 7 – разломы; 8 – активные вулканы; 9 – четвертичные осадочные породы северо-восточной части острова Сулавеси; 10 – четвертичные вулканические породы (дациты, андезиты, базальты); 11 – эоцен-раннеплиоценовые риолиты, андезибазальты, базальты; 12 – эоцен-миоценовые осадочные породы; 13 – кислые и средние интрузивы, преимущественно граниты (эоцен-плиоцен); 14 – локальные разломы; 15 – прочие границы; 16 – изученные вулканы.

Fig. 1. Scheme of geological structure of northeast Sulawesi Island, after (Maulana et al., 2016; Advokaat et al., 2017; Zhang et al., 2022).

1 – Quaternary and Neogene sediments; 2 – Cenozoic volcanic and plutonic rocks; 3 – metamorphic rocks; 4 – ophiolite complexes; 5 – continental basement; 6 – strike-slip faults; 7 – faults; 8 – active volcanoes; 9 – Quaternary sedimentary rocks of the northeastern part of Sulawesi Island; 10 – Quaternary volcanic rocks (dacite, andesite, basalt); 11 – Eocene-Early Pliocene rhyolite, basaltic andesite, basalts; 12 – Eocene-Miocene sedimentary rocks; 13 – felsic and intermediate intrusives, mainly, granites (Eocene-Pliocene); 14 – local faults; 15 – other boundaries; 16 – studied volcanoes.

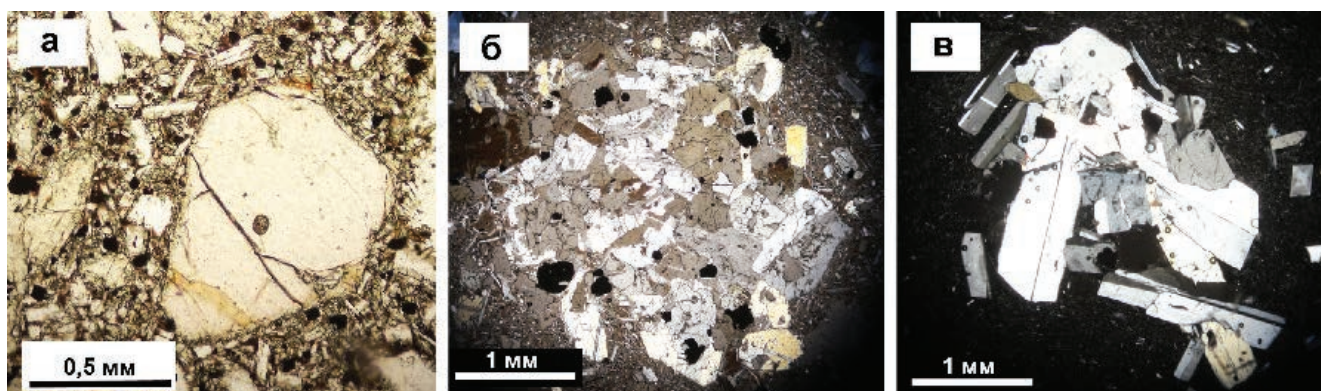


Рис. 2. Вкрапленники плагиоклаза в базальте (а), андезите (б) и даците (в). Проходящий свет; фото б, в – с поляризатором.

Fig. 2. Plagioclase phenocrysts in basalt (a), andesite (б), and dacite (в). Transmitted light; б, в – with polarizer.

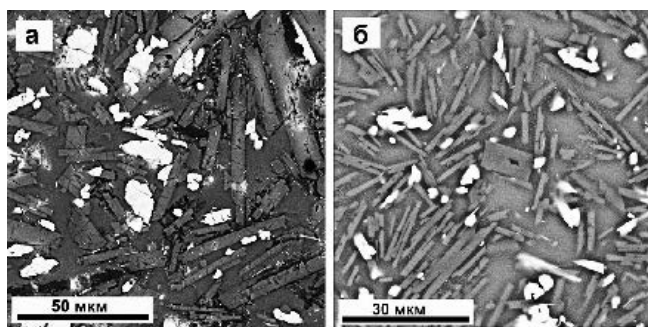


Рис. 3. Основная масса в андезите (а) и даците (б). СЭМ-фото.

Fig. 3. Groundmass of andesite (a) and dacite (b). BSE image.

(рис. 3б). При этом дацит имеет более микрозернистую структуру основной массы по сравнению с андезитом (рис. 3а).

На основе состава вкрапленников плагиоклазов и микрокристаллов основной массы (табл. 1), проведен сравнительный анализ особенностей формирования базальтов, андезитов и дацитов острова. На диаграмме K_2O –An вкрапленники плагиоклаза в эффузивах характеризуются единым трендом роста содержания K_2O при падении значений анортитового компонента (An) (рис. 4). Можно выделить четыре последовательные группы. Фенокристаллы из базальта образуют отдельную группу с минимумом содержания K_2O и максимальными значениями An (битовнит-анортит). В группе, отвечающей по составу лабрадору-битовниту, присутствуют минералы из базальта и дацита. Плагиоклазы из андезита

соответствуют андезину-лабрадору. Относительный максимум содержания K_2O для вкрапленников характерен для андезинов из отдельной группы минералов из дацита. Наиболее обогащены K_2O микрокристаллы плагиоклаза (андезины) из основной массы дацита (рис. 4).

Расплавные и флюидные включения в плагиоклазах

Первичные расплавные включения (размер 5–50 мкм) в плагиоклазе из разных типов эффузивных пород имеют как сходные черты, так и отличия. Расплавные включения в плагиоклазе из базальтов равномерно распределены в кристаллах (рис. 5а), а также располагаются по зонам роста. Включения местами обладают огранкой и содержат несколько коричневых и зеленоватых фаз, а также светлое стекло (обычно по краю включений) и газовый пузырек. В плагиоклазе из андезитов расплавные включения заполняют центры вкрапленников и располагаются прямолинейными полосами. Включения имеют отчетливую огранку и обычно сложены преимущественно стеклом с газовым пузырьком (рис. 5б). Реже присутствуют темные многофазные микрозернистые включения. Для плагиоклаза из дацитов характерно равномерное распределение расплавных включений в кристаллах. Включения обладают огранкой и содержат множество преимущественно темных, а также зеленоватых фаз (рис. 5в). Присутствует светлое стекло и газовый пузырек.

Таблица 1

Представительные анализы плагиоклазов (мас. %) из эффузивов острова Сулавеси

Table 1

Representative analyses (wt. %) of plagioclases from volcanic rocks of Sulawesi Island

№ п/п	№ анализа	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма
1	15	51.09	0.00	29.76	0.00	0.89	0.00	0.00	14.03	3.75	0.17	99.69
2	24	45.74	0.00	33.27	0.00	0.72	0.00	0.00	17.95	1.40	0.00	99.08
3	42	53.03	0.00	27.91	0.00	0.84	0.00	0.00	12.05	4.58	0.18	98.59
4	61	45.31	0.00	34.03	0.00	0.69	0.00	0.00	18.51	1.06	0.00	99.60
5	62	45.46	0.00	33.99	0.00	0.73	0.00	0.00	18.53	1.16	0.00	99.87
6	71	45.83	0.00	33.22	0.00	0.68	0.00	0.00	18.06	1.46	0.00	99.25
7	105	53.44	0.03	28.57	0.00	0.92	0.01	0.09	12.17	4.63	0.18	100.04
8	108	51.65	0.03	29.82	0.00	0.98	0.02	0.09	13.44	3.86	0.13	100.01
9	112	54.52	0.04	27.85	0.01	0.87	0.01	0.11	11.20	5.14	0.20	99.94
10	122	45.78	0.02	34.75	0.00	0.70	0.00	0.04	18.05	1.10	0.02	100.46
11	134	50.58	0.03	30.81	0.04	0.90	0.00	0.08	14.08	3.19	0.10	99.81
12	161	46.45	0.03	33.32	0.07	0.66	0.00	0.04	17.32	1.53	0.03	99.43

№ п/п	№ анализа	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма
13	131	55.91	0.04	26.42	0.00	0.55	0.00	0.05	10.18	5.46	0.23	98.84
14	138	55.78	0.04	27.02	0.22	0.94	0.01	0.07	10.04	5.23	0.26	99.63
15	14	54.36	0.00	27.59	0.00	0.64	0.00	0.00	11.26	5.07	0.20	99.12
16	34	55.13	0.00	26.98	0.00	0.59	0.00	0.00	10.68	5.22	0.22	98.82
17	35	54.47	0.00	27.51	0.00	0.57	0.00	0.00	11.05	5.22	0.22	99.04
18	41	55.26	0.00	26.96	0.00	0.64	0.00	0.00	10.56	5.46	0.20	99.08
19	43	54.23	0.00	28.00	0.00	0.66	0.00	0.00	11.61	4.93	0.18	99.61
20	49	52.95	0.00	28.44	0.00	1.02	0.00	0.00	12.03	4.60	0.17	99.21
21	50	55.60	0.00	26.96	0.00	0.68	0.00	0.00	10.40	5.54	0.25	99.43
22	51	55.28	0.00	27.11	0.00	0.63	0.00	0.00	10.47	5.31	0.25	99.05
23	52	55.84	0.00	26.68	0.00	0.68	0.00	0.00	10.30	5.62	0.27	99.39
24	63	55.30	0.00	26.59	0.00	0.75	0.00	0.00	10.40	5.46	0.25	98.75
25	99	56.50	0.00	26.91	0.00	0.55	0.00	0.00	10.13	5.73	0.27	100.09
26	102	56.03	0.00	27.15	0.00	0.63	0.00	0.00	10.44	5.45	0.29	99.99
27	109	58.05	0.00	25.94	0.00	0.49	0.00	0.00	8.80	6.36	0.39	100.05
28	116	50.91	0.00	30.11	0.00	0.77	0.00	0.00	14.26	3.51	0.14	99.70
29	124	57.92	0.00	26.20	0.00	0.46	0.00	0.00	9.07	6.34	0.34	100.34
30	143	58.22	0.00	25.90	0.00	0.49	0.00	0.00	8.91	6.28	0.40	100.19
31	28	56.76	0.03	26.46	0.02	0.59	0.01	0.02	9.52	6.02	0.28	99.70
32	31	52.56	0.02	28.86	0.00	0.56	0.01	0.02	12.38	4.54	0.15	99.10
33	40	53.09	0.04	28.89	0.01	0.60	0.00	0.05	12.22	4.75	0.18	99.83
34	61	51.85	0.04	29.78	0.00	0.64	0.01	0.02	13.17	4.06	0.14	99.71
35	78	55.33	0.04	27.07	0.00	0.52	0.01	0.00	10.07	5.85	0.25	99.14
36	83	56.48	0.02	26.82	0.00	0.53	0.00	0.00	9.66	6.10	0.29	99.90
37	137	49.74	0.00	29.70	0.00	1.24	0.00	0.00	14.44	3.36	0.11	98.59
38	151	49.48	0.00	30.04	0.00	1.04	0.00	0.00	14.24	3.34	0.16	98.30
39	152	55.07	0.00	26.72	0.00	0.85	0.00	0.00	10.62	5.49	0.29	99.04
40	159	54.08	0.00	26.83	0.00	1.03	0.00	0.00	10.93	5.10	0.30	98.27
41	168	52.86	0.00	28.30	0.00	0.96	0.00	0.00	12.26	4.45	0.24	99.07
42	170	53.70	0.00	27.91	0.00	1.14	0.00	0.00	11.61	4.80	0.30	99.46
43	173	53.25	0.00	27.61	0.00	0.95	0.00	0.00	11.67	4.60	0.27	98.35
44	175	52.86	0.00	28.12	0.00	1.14	0.00	0.00	12.09	4.35	0.24	98.80
45	179	53.74	0.00	27.28	0.00	1.04	0.00	0.00	11.19	4.95	0.34	98.54
46	183	57.36	0.00	25.79	0.00	0.93	0.00	0.00	9.50	5.84	0.51	99.93
47	187	56.91	0.00	26.06	0.22	1.07	0.00	0.00	10.34	4.91	0.58	100.09
48	193	54.62	0.00	26.53	0.00	1.09	0.00	0.00	10.40	5.20	0.36	98.20
49	144	60.18	0.00	23.01	0.00	0.82	0.00	0.00	6.87	6.48	0.84	98.20
50	146	60.99	0.00	23.45	0.00	0.94	0.00	0.00	7.01	6.67	0.77	99.83
51	151	62.30	0.00	20.71	0.00	2.66	0.00	0.45	5.65	6.94	0.96	99.67
52	157	58.19	0.00	24.92	0.00	0.84	0.00	0.00	8.37	6.46	0.52	99.30
53	170	55.17	0.00	26.62	0.00	0.69	0.00	0.00	10.05	5.62	0.39	98.54
54	172	63.47	0.17	21.62	0.00	0.95	0.00	0.00	5.61	7.02	1.30	100.14
55	176	56.82	0.00	25.75	0.00	0.80	0.00	0.00	8.97	6.27	0.42	99.03
56	186	59.88	0.00	23.77	0.00	0.89	0.00	0.00	7.46	6.43	0.71	99.14
57	189	59.39	0.00	24.26	0.00	0.94	0.00	0.00	7.35	6.96	0.63	99.53
58	197	57.29	0.00	25.02	0.00	0.85	0.00	0.00	8.55	6.03	0.60	98.34
59	199	62.17	0.00	22.41	0.00	0.94	0.00	0.00	5.92	7.06	0.98	99.48

Примечание. 1–36 – состав вкрапленников плагиоклаза из базальтов (1–12), андезитов (13–24) и дацитов (25–36); 37–59 – состав микрокристаллов плагиоклаза из основной массы андезитов (37–48) и дацитов (49–59).

Note. 1–36 – the composition of plagioclase phenocrysts from basalt (1–12), andesite (13–24) and dacite (25–36); 37–59 – the composition of plagioclase microcrystals from the groundmass of andesite (37–48) and dacite (49–59).

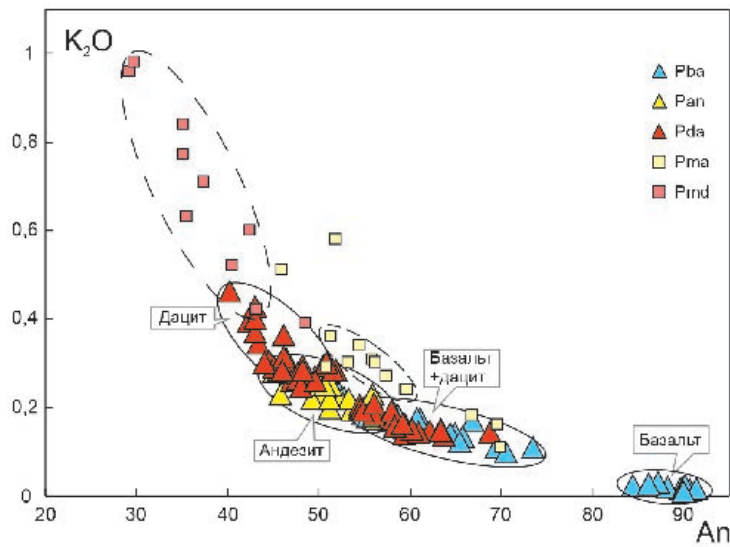


Рис. 4. Состав (мас. %) плагиоклазов из эффузивных пород.

Вкрапленники плагиоклаза в базальте (Pba), андезите (Pan) и даците (Pda). Кристаллы плагиоклаза в основной массе андезита (Pma) и дацита (Pmd).

Fig. 4. Composition (wt. %) of plagioclases from volcanic rocks.

Plagioclase phenocrysts in basalt (Pba), andesite (Pan), and dacite (Pda). Plagioclase crystals in the groundmass of andesite (Pma) and dacite (Pmd).

Во время высокотемпературного плавления и гомогенизации содержимого расплавных включений в плагиоклазах необходимо учитывать присутствие кислых магматических систем. Участие кислых расплавов вполне реально, т. к. в данном случае рассматриваются дациты, к тому же ранее был установлен кислый состав расплавных включений в плагиоклазе из андезитов острова Сулавеси (Симонов и др., 2022). Соответственно, можно ожидать значительную вязкость и низкие температуры расплавов, из которых кристаллизуются полевые шпаты. В связи с этим, были проведены эксперименты с длительными (60 мин) выдержками многофазных включений в плагиоклазе из дацитов при температурах 800 и 900 °С. Наблюдения в процессе нагрева в микротермокамере не выявили принципиальных изменений, связанных с плавлением и появлением расплава, при этих температурах. Микроскопическое сравнение первоначального состояния (до прогрева) включения (рис. 6а) и включения, закаленного после прогрева с часовой выдержкой при 800 °С и далее при 900 °С, показало, что формы основных фаз во включении сохранились, при этом центральная часть включения стала более мелкозернистой (рис. 6б).

Эти эксперименты показали, что при температурах ~900 °С содержимое включения в плагиоклазе из дацита перекристаллизуется, что обычно

предшествует процессам плавления, а само плавление многофазного включения должно происходить при более высоких температурах. Длительные эксперименты свидетельствуют о том, что температуры плавления и гомогенизации содержимого включений (соответственно, температуры кристаллизации плагиоклаза из дацита) были выше 900 °С. Последующие термометрические опыты в микротермокамере с расплавными включениями в плагиоклазе из базальтов, андезитов и дацитов проводились с учетом результатов длительных экспериментов, приведенных выше.

Начиная с температуры 820 °С, содержимое включений в плагиоклазе из базальтов темнеет и при температуре ~980 °С появляются первые порции светлого расплава. При температурах 1100–1135 °С плавятся кристаллические фазы и, начиная с температуры 1150 °С, включения содержат светлый гомогенный расплав с небольшим флюидным пузырьком. Полная гомогенизация некоторых включений наблюдается при температуре около 1180 °С. После прогрева и закалки в сохранившихся включениях преобладает гомогенное стекло, содержащее флюидный пузырек (рис. 7а).

При повышении температуры от 830 до 1000 °С во включениях в плагиоклазе из андезитов изменяются фазы, деформируется газовый пузырек и развивается расплав. При дальнейшем нагреве

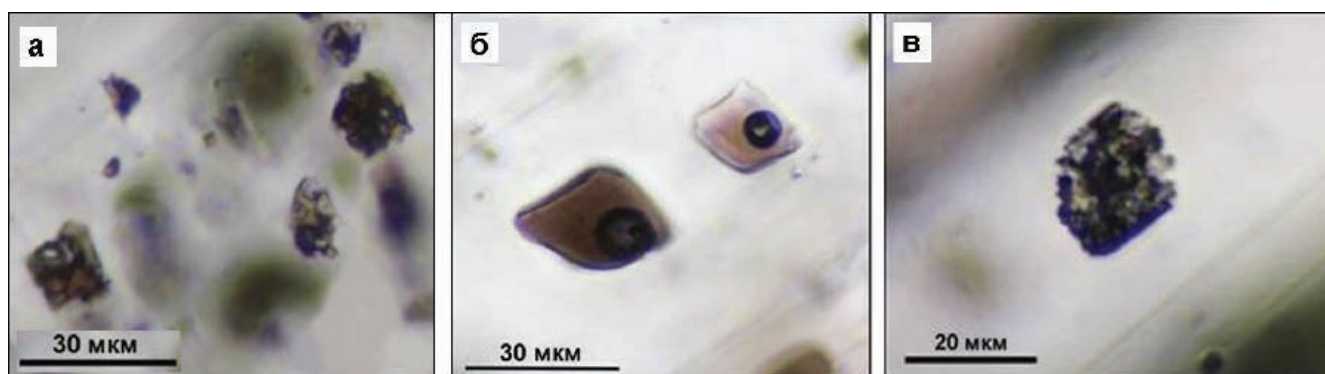


Рис 5. Расплавные включения в плагиоклазе из базальта (а), андезита (б) и дацита (в) до высокотемпературных экспериментов.

Здесь и на рис. 6–8, проходящий свет.

Fig. 5. Melt inclusions in plagioclase from (a) basalt, (б) andesite, and (в) dacite before high-temperature experiments.

Here and in Figs. 6–8, transmitted light.

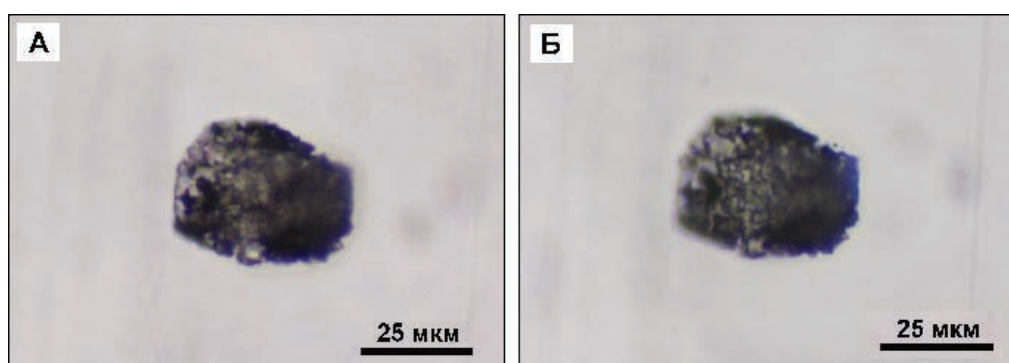


Рис 6. Многофазное расплавное включение в плагиоклазе из дацита до опыта (А) и после длительной выдержки при 800–900 °С и закалки (Б).

Fig. 6. Multiphase melt inclusion in plagioclase of dacite before the experiment (A) and after long-term exposure at 800–900 °C and quenching (B).

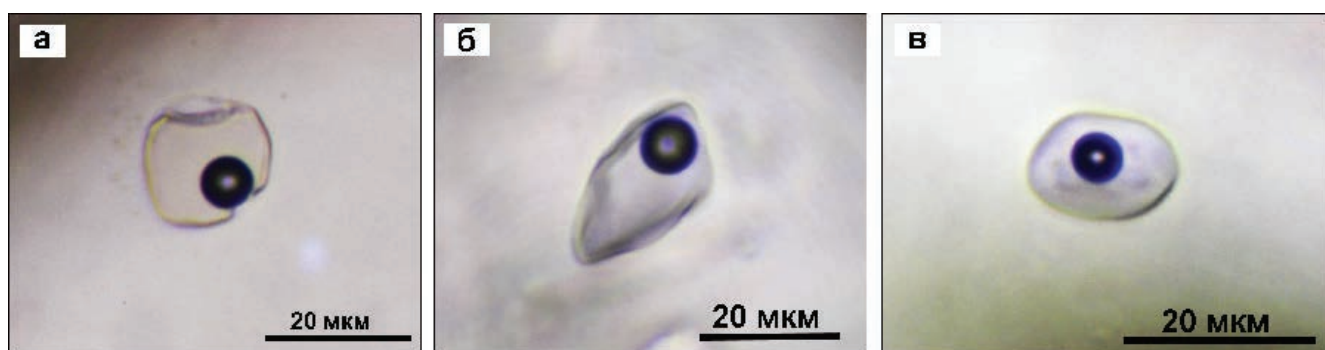


Рис 7. Расплавные включения в плагиоклазе из базальта (а), андезита (б) и дацита (в) после высокотемпературных экспериментов и закалки.

Fig. 7. Melt inclusions in plagioclase from basalt (а), andesite (б) and dacite (в) after high-temperature experiments and quenching.

небольшие включения (5–15 мкм) гомогенизируются в светлый расплав при температурах 1090–1120 °С. Включения после закалки содержат стекло и газовые пузырьки (рис. 7б).

Включения в плагиоклазе из дацитов при температуре 900 °С темнеют и становятся более мелкозернистыми. При температуре ~1000 °С появляется светлый расплав. При температуре ~1050 °С происходит плавление фаз, формирование газовых

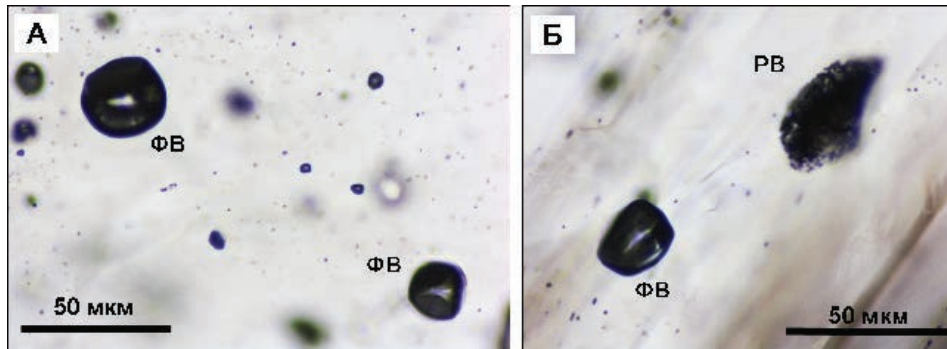


Рис 8. Сингенетичные флюидные (ФВ) и расплавные (РВ) включения в плагиоклазе из дацита.
Fig. 8. Syngenetic fluid (ФВ) and melt (РВ) inclusions in plagioclase from dacite.

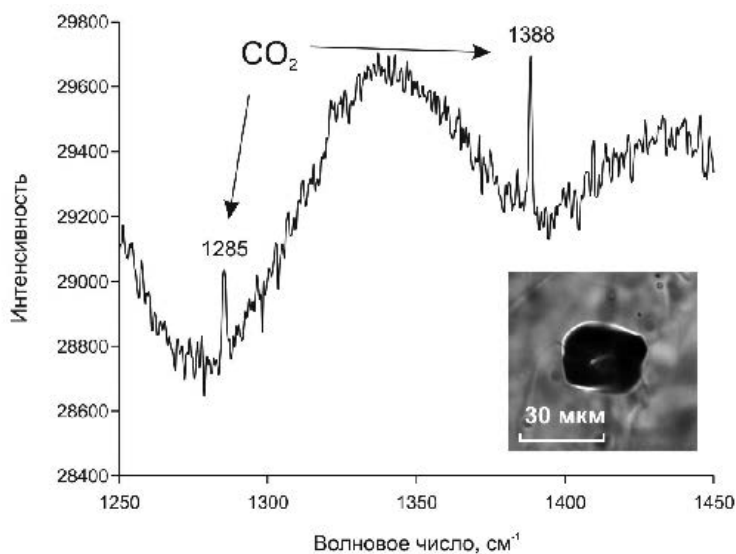


Рис 9. КР спектр флюидного включения в плагиоклазе из дацита.
Fig. 9. Raman spectrum of fluid inclusion in plagioclase from dacite.

пузырьков и появление светлого расплава. Высокотемпературные процессы (1050–1100 °С) плавления кристаллических фаз и формирования газовых пузырьков происходят в первые минуты экспериментов, т. е. не наблюдается повышенная вязкость расплава во включении. Часть мелких (менее 10 мкм) включений становятся полностью гомогенными (светлый расплав) при температуре ~1130 °С, а в более крупных включениях последние кристаллические фазы плавятся в светлом расплаве и сливаются отдельные пузырьки. При температурах ~1150–1160 °С включения обычно содержат светлый гомогенный расплав с флюидным пузырьком (рис. 7в).

Плагиоклаз из дацита содержит сингенетичные первичные расплавные и флюидные включения (рис. 8), что свидетельствует о пересыщении расплава летучими компонентами и делает практически невозможным полностью гомогенизировать содержимое расплавных включений. Подобное со-

существование первичных флюидных и расплавных включений наблюдалось во вкрапленниках из пород других вулканических комплексов (Бакуменко и др., 1999) и установлено нами ранее в фенокристаллах плагиоклаза из эффузивов вулкана Горелый (Симонов и др., 2021), а также игнимбригов вулкана Хангар (Симонов и др., 2022), и является прямым доказательством фазовой сепарации (вскипания) расплава на определенной стадии развития магматической системы. Анализ флюидных включений в плагиоклазе из дацита с помощью КР спектроскопии показал, что преобладающим компонентом является CO_2 (рис. 9). Изученные флюидные включения в большинстве случаев приурочены к центральным зонам вкрапленников плагиоклаза (рис. 10), т. е. кристаллизация определенной части полевых шпатов в даците связана с летучими компонентами и ее начало обусловлено процессами вскипания расплава.

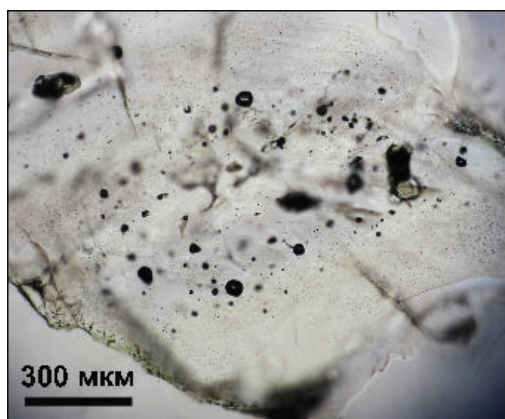


Рис 10. Флюидные включения, приуроченные к центральной части вкрапленника плагиоклаза в даците.

Fig. 10. Fluid inclusions confined to the central part of the plagioclase phenocryst in dacite.

Состав расплавных включений в плагиоклазах

Анализ гомогенных стекол прогретых и закаленных включений в плагиоклазе (табл. 2) позволил выяснить особенности состава расплавов, принимавших участие в формировании полевых шпатов в базальтах, андезитах и дацитах. Для определения физико-химических условий кристаллизации плагиоклазов использованы гомогенные стекла прогретых и закаленных расплавных включений. В то же время, природно-закаленные стекла практически полностью стекловатых включений также несут важную генетическую информацию. Соответственно, совместное использование стекол прогретых и непрогретых включений может способствовать получению наиболее достоверных данных, позволяющих решать важные вопросы. Например, во время экспериментов по гомогенизации расплавных включений в плагиоклазах при температурах свыше 1100 °С иногда трудно зафиксировать все изменения во включениях. В частности, учитывая высокие содержания алюминия и кальция в плагиоклазе, можно предположить захват этих элементов расплавом включения при высоких температурах. Совместное использование данных по стеклам прогретых и природно-закаленных включений позволяет решить эту проблему.

На диаграмме CaO–Al₂O₃ состав стекол из эффузивов разбивается на две группы: с более низкими содержаниями CaO и Al₂O₃ (прогретые включения в плагиоклазе из андезитов и дацитов, а также стекла основной массы из этих пород) и с более высокими (прогретые включения в плагиоклазе из базальтов). Содержание CaO и Al₂O₃ во включени-

ях из первой группы близко таковым из природных стекол непрогретых включений в плагиоклазе из андезитов вулкана Меньший Брат на острове Итуруп, Курильские острова (Низаметдинов, 2022) (рис. 11). Этот факт свидетельствует об отсутствии в ходе высокотемпературных экспериментов захвата алюминия и кальция через стенки включений в плагиоклазе из андезитов. То же характерно и для состава стекол прогретых включений в плагиоклазе из дацитов, большая часть которых приурочена к полю стекол непрогретых включений в плагиоклазе вулкана Меньший Брат (рис. 11).

Относительно высокие содержания CaO и Al₂O₃ установлены в стеклах прогретых включений в плагиоклазе из базальта вулкана Локон. Учитывая состав стекол непрогретых включений в минералах из эффузивов вулкана Сопутан (Kunrat, 2017), подобные содержания характерны для базальтоидных магм вулканогенной структуры, в которую помимо отмеченных вулканов входит и кальдера Тондоно (рис. 1). Близкие повышенные содержания CaO и Al₂O₃ (рис. 11) характерны для стекол непрогретых включений в кристаллах плагиоклаза вулкана Толбачик (Добрецов и др., 2016).

По соотношению CaO–MgO стекла прогретых расплавных включений в исследованных плагиоклазах формируют две группы, связанные трендом эволюции составов эффузивов. Компактную группу с минимальными содержаниями CaO и MgO образуют, совместно с соответствующими эффузивами, расплавные включения в плагиоклазе из андезитов и дацитов, располагающиеся в поле природно-закаленных стекол из включений в плагиоклазе из андезитов вулкана Меньший Брат (рис. 12). В группу с повышенными содержаниями CaO и MgO входят составы стекол прогретых включений в плагиоклазе из базальтов вулкана Локон, большая часть которых, совместно с составами базальтов этого района, располагается в поле природно-закаленных стекол из включений в минералах из эффузивов вулкана Сопутан (рис. 12).

На диаграмме (Na₂O + K₂O)–SiO₂ практически все составы гомогенных стекол прогретых расплавных включений в изученных вкрапленниках плагиоклаза из базальтов, андезитов и дацитов (также как и эффузивы северо-востока этого острова) находятся в области пород нормальной щелочности (рис. 13). Они разбиваются на две группы «базитового» (52–56 мас. % SiO₂) и кислого (66–80 мас. % SiO₂) составов. В первую группу входят включения в плагиоклазе из базальтов, а во вторую – из анде-

Таблица 2

Представительные анализы (мас. %) гомогенных стекол в прогретых расплавных включениях и основной массе из эффузивов острова Сулавеси

Table 2

Representative analyses (wt. %) of homogeneous glasses in heated melt inclusions and the groundmass of volcanic rocks of Sulawesi Island

№ п/п	№ анализа	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Cl	Сумма
1	5	53.66	0.87	17.40	9.64	0.00	2.27	8.51	3.76	1.19	0.12	97.42
2	7	52.69	0.98	17.42	9.87	0.00	2.22	8.69	3.84	1.17	0.12	97.00
3	13	52.88	1.17	17.82	10.74	0.27	2.47	9.04	3.49	1.31	0.15	99.34
4	22	50.96	1.17	15.08	10.96	0.22	5.17	9.50	3.61	0.73	0.09	97.49
5	34	51.49	0.97	16.00	10.86	0.23	4.03	9.81	3.60	0.96	0.09	98.04
6	39	54.32	1.20	16.42	9.22	0.27	2.59	8.31	4.00	1.05	0.00	97.38
7	45	50.66	0.97	16.04	10.38	0.23	5.47	9.91	3.52	0.67	0.00	97.85
8	48	50.47	0.97	15.83	10.00	0.25	5.67	10.20	3.64	0.61	0.09	97.73
9	53	51.88	0.80	15.51	9.56	0.23	5.97	9.88	3.50	0.76	0.00	98.09
10	55	51.13	0.88	16.21	9.46	0.22	5.37	9.91	4.25	0.63	0.00	98.06
11	64	51.22	1.07	15.51	10.29	0.23	5.51	9.89	3.32	0.57	0.09	97.70
12	68	52.07	1.03	15.74	10.02	0.00	5.21	9.71	3.67	0.66	0.00	98.11
13	1	79.24	0.48	9.71	1.76	0.00	0.17	1.39	3.02	2.55	0.00	98.32
14	6	69.72	0.27	16.04	1.12	0.00	0.00	4.48	3.94	1.82	0.00	97.39
15	23	74.54	0.65	10.47	3.20	0.00	0.45	2.14	3.32	2.61	0.14	97.52
16	24	74.30	0.72	11.51	2.56	0.00	0.33	2.21	3.29	2.70	0.11	97.73
17	25	64.44	0.73	17.25	3.13	0.00	0.51	4.62	4.50	2.46	0.16	97.80
18	26	76.20	0.73	11.00	2.26	0.00	0.38	2.01	3.29	2.69	0.09	98.65
19	31	78.66	0.78	9.26	2.48	0.00	0.30	1.74	2.82	2.48	0.09	98.61
20	38	78.15	0.70	9.24	2.61	0.00	0.43	1.51	2.62	2.60	0.12	97.98
21	48	71.75	0.40	14.21	2.17	0.00	0.35	3.97	3.61	2.34	0.09	98.89
22	55	78.07	0.57	11.11	1.92	0.00		2.27	3.11	2.26	0.00	99.31
23	59	75.11	0.52	11.54	1.89	0.00	0.17	2.52	3.02	2.29	0.00	97.06
24	60	77.34	0.55	10.03	2.14	0.00	0.23	1.92	2.56	2.37	0.09	97.23
25	92	70.11	0.35	14.62	2.47	0.00	0.32	3.16	3.93	2.49	0.13	97.59
26	98	66.35	0.54	17.22	2.65	0.00	0.51	3.58	4.94	2.28	0.12	98.17
27	103	71.78	0.66	12.92	3.14	0.00	0.56	1.98	3.49	3.64	0.25	98.41
28	105	67.33	0.35	15.68	3.17	0.00	0.51	2.80	4.47	3.67	0.27	98.26
29	106	68.34	0.45	15.26	2.48	0.00	0.40	2.64	4.11	3.63	0.25	97.57
30	111	67.60	0.59	16.39	2.90	0.00	0.54	3.31	4.25	3.01	0.23	98.83
31	113	72.16	0.41	13.75	2.44	0.00	0.36	2.33	3.84	3.12	0.19	98.60
32	121	65.17	0.23	16.90	3.61	0.21	0.66	4.04	4.79	2.76	0.25	98.63
33	125	65.38	0.36	17.38	2.56	0.00	0.00	2.62	4.91	4.54	0.31	98.06
34	128	67.96	1.27	15.83	2.93	0.00	0.00	2.05	4.14	4.63	0.29	99.11
35	129	69.85	0.44	16.34	1.66	0.00	0.00	1.79	4.68	4.73	0.36	99.86
36	135	64.73	0.54	18.55	2.80	0.00	0.36	3.14	5.32	4.16	0.25	99.85
37	138	73.77	0.85	10.75	1.74	0.00	0.00	0.55	2.44	5.02	0.13	95.25
38	140	74.34	0.60	10.60	1.51	0.00	0.00	0.36	2.60	5.20	0.16	95.37
39	154	74.45	0.65	10.52	1.30	0.00	0.00	0.32	2.63	5.13	0.14	95.14
40	160	74.13	0.77	10.51	1.76	0.00	0.00	0.31	2.76	5.04	0.12	95.40
41	171	74.04	0.72	10.68	1.57	0.00	0.00	0.35	2.84	5.12	0.17	95.49
42	176	74.32	0.68	10.68	1.43	0.00	0.00	0.34	2.60	5.23	0.14	95.42
43	178	74.04	0.67	10.68	1.63	0.00	0.00	0.35	2.71	5.22	0.10	95.40
44	184	73.74	0.80	10.39	1.72	0.00	0.00	0.41	2.75	5.14	0.15	95.10
45	186	74.11	0.72	10.47	1.69	0.00	0.00	0.35	2.44	5.17	0.14	95.09

№ п/п	№ анализа	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Cl	Сумма
46	188	74.04	0.65	10.49	1.93	0.00	0.00	0.45	2.62	5.20	0.14	95.52
47	192	73.47	0.62	10.47	1.97	0.00	0.00	0.39	2.79	5.16	0.18	95.05
48	148	76.38	0.75	10.69	1.35	0.00	0.00	0.39	2.59	5.22	0.30	97.67
49	159	76.44	0.73	10.71	1.11	0.00	0.00	0.42	2.75	5.10	0.27	97.53
50	162	75.86	0.72	11.37	1.25	0.00	0.00	0.67	3.01	4.60	0.22	97.70
51	163	76.76	0.75	10.60	1.53	0.00	0.00	0.34	2.47	5.06	0.27	97.78
52	165	76.03	0.65	11.47	1.08	0.00	0.00	0.71	2.87	4.81	0.23	97.85
53	168	76.33	0.60	10.75	1.13	0.00	0.00	0.34	2.67	5.25	0.24	97.31
54	174	76.16	0.67	11.22	1.31	0.00	0.00	0.57	3.11	4.85	0.24	98.13
55	187	76.59	0.70	10.69	1.27	0.00	0.00	0.35	2.88	5.23	0.28	97.99
56	188	76.33	0.63	11.71	1.27	0.00	0.00	0.97	3.14	4.41	0.21	98.67
57	195	76.63	0.72	10.83	1.16	0.00	0.00	0.62	2.67	4.93	0.21	97.77
58	202	76.48	0.72	10.60	1.48	0.00	0.00	0.39	2.64	5.01	0.22	97.54
59	209	76.65	0.68	10.49	1.42	0.00	0.00	0.35	2.63	4.96	0.26	97.44

Примечание. 1–36 – состав гомогенных стекол прогретых включений во вкрапленниках плагиоклаза из базальтов (1–12), андезитов (13–24) и дацитов (25–36); 37–59 – состав природно-закаленных стекол из основной массы андезитов (37–47) и дацитов (48–59).

Note. 1–36 – the composition of homogeneous glasses in heated melt inclusions in plagioclase phenocrysts from basalt (1–12), andesite (13–24) and dacite (25–36); 37–59 – the composition of naturally quenched glasses from the groundmass of andesite (37–47) and dacite (48–59).

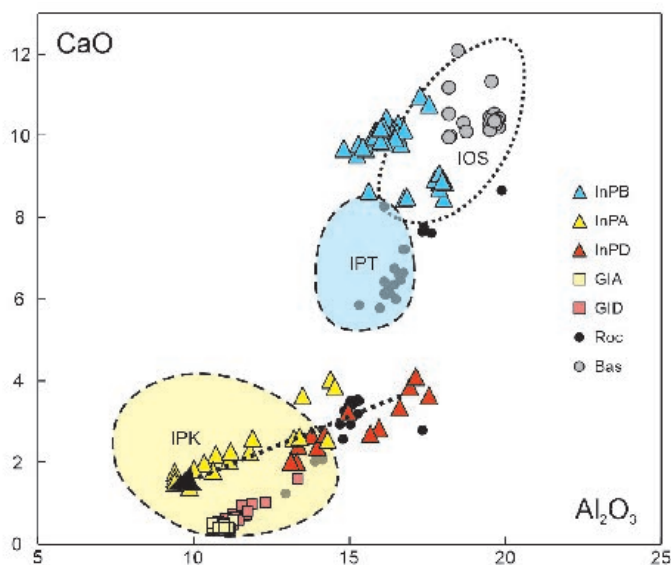


Рис. 11. Диаграмма CaO–Al₂O₃ (мас. %) для гомогенных стекол расплавных включений в плагиоклазе из эффузивов острова Сулавеси.

Здесь и на рис. 11–14: стекла прогретых включений в плагиоклазе из базальтов вулкана Локон (InPB), андезитов кальдеры Тондоно (InPA) и дацитов вулкана Локон (InPD). Стекла основной массы из андезитов кальдеры Тондоно (GIA) и дацитов вулкана Локон (GID). Эффузивы среднего и кислого составов (Roc) и базальты (Bas) северо-востока острова Сулавеси. Поля стекол непрогретых включений: в плагиоклазе из андезитов вулкана Меньший Брат, Курильские острова (IPK), плагиоклазовых кристаллах-лапиллях вулкана Толбачик, Камчатка (IPT), оливине из эффузивов вулкана Сопутан (IOS). Точечная линия – тренд стекол расплавных включений в плагиоклазе из андезитов и дацитов острова Сулавеси. Составы пород и включений пересчитаны на 100 %. Рисунок основан на оригинальных данных и материалах (Kushendratno et al., 2012; Добрецов и др., 2016; Kunrat, 2017; Низаметдинов, 2022).

Fig. 11. CaO–Al₂O₃ plot (wt. %) for homogeneous glasses of melt inclusions in plagioclase from effusive rocks of Sulawesi Island.

Here and in Figs. 11–14: glasses of heated inclusions in plagioclase from basalt of Lokon volcano (InPB), andesite of Tondono caldera (InPA), and dacite of Lokon volcano (InPD). The glasses of the groundmass from andesite of Tondono caldera (GIA) and dacite of Lokon volcano (GID). Intermediate and felsic effusive rocks (Roc) and basalt (Bas) from the northeast of the Sulawesi

Island. Fields of glasses of unheated inclusions: in plagioclase from andesite of Menshii Brat volcano, Kuril Islands (IPK), plagioclase lapilli crystals of Tolbachik volcano, Kamchatka (IPT), and olivine from effusive rocks of Soputan volcano (IOS). Dotted line – trend of glasses of melt inclusions in plagioclase from andesite and dacite of Sulawesi Island. The compositions of rocks and inclusions are recalculated to 100 %. The figure is based on original data and materials of (Kushendratno et al., 2012; Dobretsov et al., 2016; Kunrat, 2017; Nizametdinov, 2022).

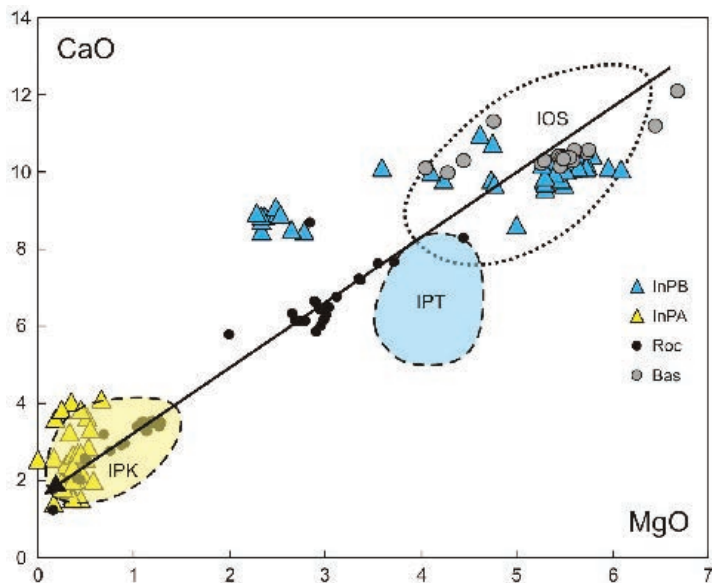


Рис. 12. Диаграмма CaO–MgO (мас. %) для гомогенных стекол расплавных включений в плагиоклазе из эффузивов острова Сулавеси.

Fig. 12. CaO–MgO plot (wt. %) for homogeneous glasses of melt inclusions in plagioclase from volcanic rocks of Sulawesi Island.

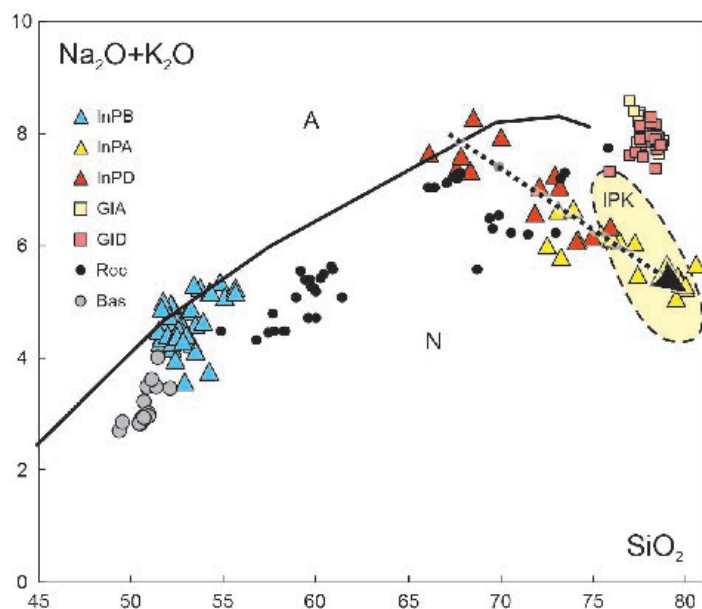


Рис. 13. Диаграмма $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ – SiO_2 (мас. %) для гомогенных стекол расплавных включений в плагиоклазе из эффузивов острова Сулавеси.

Области щелочных (A) и нормальных (N) пород. Рисунок построен на основе оригинальных данных с использованием материалов из работ (Петрографический..., 2009; Kushendratno et al., 2012; Kunrat, 2017; Низаметдинов, 2022).

Fig. 13. $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ – SiO_2 plot (wt. %) for homogeneous glasses of melt inclusions in plagioclase from volcanic rocks of Sulawesi Island.

Areas of alkaline (A) and normal (N) rocks. The figure is based on original data and materials of (Petrographic..., 2009; Kushendratno et al., 2012; Kunrat, 2017; Nizametdinov, 2022;).

зитов и дацитов. Необходимо отметить значительное сходство стекол включений в плагиоклазах из андезитов острова Сулавеси и острова Итуруп, несмотря на то, что в первом случае включения были прогреты и их содержимое гомогенизировано, а во втором – анализировались природно-закаленные стекла непрогретых включений в плагиоклазе. Данные факты, полученные независимыми методами, свидетельствуют о достоверном участии кислых расплавов при кристаллизации плагиоклазов из андезитов островных дуг Тихого океана. Эти расплавы, судя по наличию единого тренда для андезитов и дацитов (рис. 13), участвовали в формировании кальдеры Тондоно, а затем и в эволюции вулкана Локон.

Вариационные петрохимические диаграммы позволяют выявить характерные особенности состава гомогенных стекол прогретых расплавных включений в плагиоклазе из эффузивов. По соотношению TiO_2 , Al_2O_3 , FeO , MgO , CaO , K_2O и SiO_2 изученные включения образуют две группы «базитового» и кислого составов. Первая группа характерна для прогретых включений в плагиоклазе из базальтов вулкана Локон, перекрывается с составами стекол непрогретых включений в оливине из эффузивов вулкана Сопутан и тесно ассоциирует с непрогретыми включениями в кристаллах плагиоклаза вулкана Толбачик (Камчатка). Для второй группы (прогретые включения в плагиоклазе из андезитов и дацитов) характерны широкие вариации SiO_2 (65–80 мас. %) с трендами падения содержаний Al_2O_3 , FeO , MgO , CaO и K_2O и роста содержания TiO_2 . Поля составов прогретых включений в плагиоклазе из андезитов острова Сулавеси для всех компонентов перекрываются с полями составов стекол непрогретых включений в плагиоклазе из андезитов вулкана Меньший Брат, Курильские острова (рис. 14), что служит дополнительным свидетельством достоверности наших результатов.

Стекла включений в плагиоклазе из андезитов содержат больше SiO_2 , чем включения в дацитах, хотя при формировании кислых эффузивов расплавы должны содержать больше SiO_2 , чем в ходе кристаллизации пород среднего состава. Поля составов стекол основной массы из андезитов и дацитов практически совпадают и на большинстве вариационных диаграмм располагаются в полях включений в плагиоклазах из андезитов с максимумом SiO_2 . В то же время они явно обогащены щелочами, образуя отдельную группу (рис. 13, 14), и могут представлять третий тип расплава, участво-

вавшего в кристаллизации плагиоклазов из андезитов и дацитов.

Обсуждение результатов

Проведенные исследования позволили выявить особенности магматических процессов современных вулканических комплексов северо-востока острова Сулавеси. Плагиоклаз является сквозным минералом, присутствующим в главных типах эффузивных пород острова не только в виде вкрапленников, но и в качестве микрокристаллических фаз в основной массе. Изучение плагиоклазов позволило установить основное направление эволюции состава полевых шпатов с падением значений анортитового компонента и ростом содержания K_2O в ряду базальты – андезиты – дациты. В то же время, требует объяснения разделение вкрапленников плагиоклаза из дацита на две группы, совпадающих, в одном случае, с составами минералов из базальтов, а в другом – обладающих минимальным содержанием анортитового компонента и максимальным – K_2O . Сонахождение в одной группе части плагиоклазов из дацитов и из базальтов не может быть связано с захватом кислой магмой более ранних «базальтовых» вкрапленников, т. к. состав включений в них разный и кристаллизация шла из отдельных самостоятельных расплавов.

Судя по составу плагиоклазов из эффузивов, в их кристаллизации участвовали три типа расплавов, формировавших вкрапленники битовнит-анортита в базальтах и андезин-лабрадора в базальтах, андезитах и дацитах, а также микрокристаллики андезина в основной массе дацита.

Исследования расплавных включений сыграли большую роль для выяснения условий кристаллизации плагиоклазов из эффузивных пород. Высокотемпературные эксперименты с расплавами включениями в плагиоклазе, в том числе и из дацита, показали, что процессы плавления кристаллических фаз и формирования газовых пузырьков происходят буквально в первые минуты, т. е. повышенная вязкость расплава во включениях не наблюдается.

Данные по гомогенным стеклам прогретых включений в плагиоклазе показывают участие двух основных типов магматических систем при кристаллизации вкрапленников плагиоклаза в базальтах и андезит-дацитах. На заключительных этапах вулканических процессов формирование матрикса андезитов и дацитов происходило при участии тре-

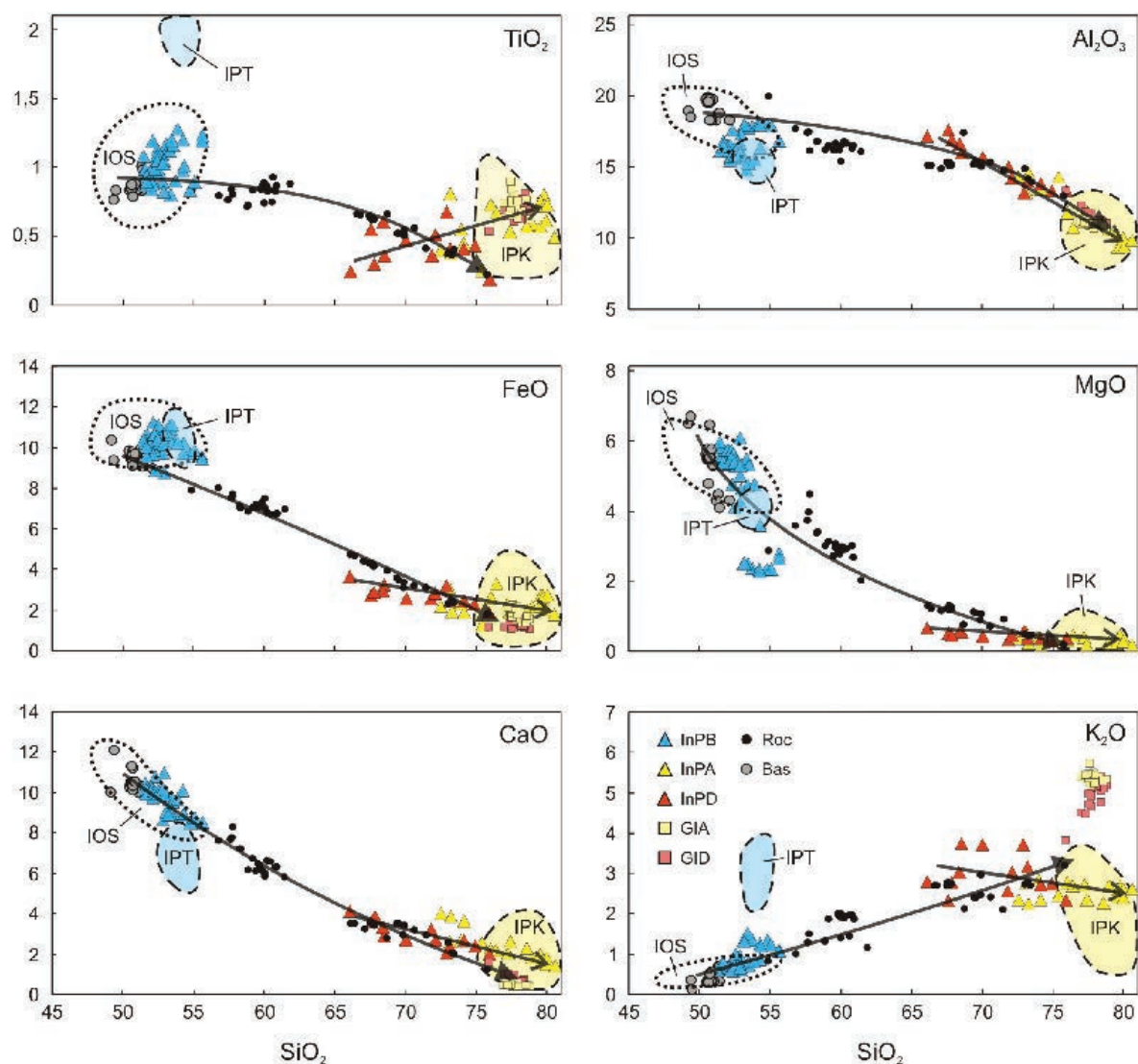


Рис. 14. Вариационные диаграммы (мас. %) для гомогенных стекол расплавных включений в плагиоклазе из эффузивов острова Сулавеси.

Сплошная линия – тренд состава вулканогенных пород северо-востока острова Сулавеси.

Fig. 14. Variation diagrams (wt. %) for homogeneous glasses of melt inclusions in plagioclase from volcanic rocks of Sulawesi Island.

Solid line – compositional trend of volcanic rocks of northeast Sulawesi Island.

тлого типа расплава с максимальным содержанием щелочей.

Резкие отличия стекол прогретых включений «базитового» и кислого составов свидетельствуют о том, что происхождение кислых магм вряд ли возможно в результате процессов последовательного фракционирования базальтоидных расплавов. Принимая во внимание то, что древние комплексы острова Сулавеси содержат гранитоиды, риолиты и метаморфические породы кислого состава (рис. 1), более вероятен процесс образования кислых расплавов при плавлении более древней остро-

водужной коры под действием базальтовой магмы. Подобная модель генерации кислых магм рассматривалась ранее для острова Итуруп, Курильские острова (Низаметдинов, 2022).

В случае дацитов, развитие кислых магматических систем осложнялось процессами фазовой сепарации с выделением микропузырьков, содержащих преимущественно CO_2 . Учитывая то, что две группы вкрапленников плагиоклаза характерны именно для дацита (рис. 4), наиболее вероятной причиной появления разных по составу фенокристаллов является вскипание расплава: часть плаги-

оклазов кристаллизовалась до фазовой сепарации магмы, а часть – после.

PT-параметры кристаллизации плагиоклазов установлены в результате расчетного моделирования на основе состава стекол прогретых включений во вкрапленниках и стекол из основной массы, а также состава полевых шпатов. Температуры кристаллизации вкрапленников плагиоклаза из базальтов вулкана Локон были рассчитаны в программе, описанной в работе (Putirka, 2008). Содержания воды (в среднем, 2.58 мас. %) оценены на основе состава расплавных включений в минералах из эффузивов вулкана Сопутан (Kunrat, 2017). В результате установлено, что вкрапленники плагиоклаза в базальтах острова Сулавеси кристаллизовались при температурах 1160–1120 °С. Эти параметры ниже температур гомогенизации включений (до 1180 °С), хотя максимальные расчетные данные близки.

Температуры кристаллизации вкрапленников плагиоклаза из андезитов кальдеры Тондоно рассчитаны на основе содержания воды в стеклах прогретых включений (1.95–4.62 мас. %), полученных с помощью КР спектроскопии. Вкрапленники плагиоклаза в андезитах образовались при температурах 930–910 и 900–890 °С, которые заметно ниже температур гомогенизации включений (1120–1090 °С).

Для вкрапленников плагиоклаза из дацита вулкана Локон температуры кристаллизации также рассчитаны с использованием содержания воды в стеклах прогретых расплавных включений (~2.38 мас. %), оцененного с помощью КР спектроскопии. Температуры кристаллизации вкрапленников (1035–970 °С) заметно ниже, чем температура гомогенизации – около 1130 °С.

В целом расчетное моделирование показало более низкие температуры кристаллизации вкрапленников плагиоклаза по сравнению с экспериментальными данными по гомогенизации включений. Учитывая то, что в случае высокотемпературных экспериментов возможен перегрев включений в плагиоклазах, расчетные температуры, по нашему мнению, являются более реальными.

Как показано выше, для андезитов и дацитов получены данные не только для вкрапленников плагиоклаза, но и микрокристаллов из основной массы пород. На основе состава микролейст и интерстициального природного стекла рассчитаны температуры кристаллизации плагиоклаза из матрикса. Содержание воды оценивалось с учетом информации по стеклам прогретых расплавных вклю-

чений во вкрапленниках плагиоклазов из андезита и дацита соответственно. Для андезитов установлено три температурных интервала формирования микрокристаллов плагиоклаза в основной массе: 875–865, 840–825 и 820–810 °С. Для дацитов температуры кристаллизации плагиоклазов из основной массы составили 900–865 °С.

Ранее установлено, что образование клинопироксена в базальтах происходило при незначительном снижении температуры при подъеме расплава и, соответственно, падения давления из нижнего магматического очага в верхний (Дмитриева и др., 2023). Таким образом, имелось основание провести расчетное моделирование декомпрессионных процессов развития расплава в программе COMAGMAT (Ariskin, Barmina, 2004). Рассматривалась равновесная декомпрессионная кристаллизация с широкими вариациями давления от 5.7 до 1.8 кбар, установленными ранее для образования клинопироксенов из базальтов вулкана Локон (Дмитриева и др., 2023), буфере QFM и значении $dP/dF = 0.1$ мол. Состав исходной магмы взят как среднее для наиболее магнезиальных составов базальтов и расплавных включений в минералах из базальтов вулканов Локон и Сопутан с содержанием MgO 7.03 мас. %. Начальное содержание воды задавалось 2 мас. %, что приводило к средним данным 2.6 мас. % H₂O в расчетных расплавах при кристаллизации плагиоклазов и клинопироксенов, отвечающим среднему количеству воды в базальтовых расплавах соседнего вулкана Сопутан – 2.58 мас. %. (Kunrat, 2017). В результате установлено, что плагиоклазы из базальтов острова Сулавеси кристаллизовались в ходе равновесных декомпрессионных процессов (от 5.7 до 1.8 кбар) при температурах от 1147 до 1086 °С, что сходно с расчетными данными по программе (Putirka, 2008) – 1160–1120 °С.

Основные выводы

Проведенные минералогические и термобарогеохимические исследования позволили выяснить условия кристаллизации плагиоклазов в базальтах, андезитах и дацитах острова Сулавеси. Вкрапленники битовнит-анортита в базальтах и андезин-лабрадора в базальтах, андезитах и дацитах, а также кристаллиты андезина в основной массе андезита и дацита формировались при участии трех типов расплавов. Кристаллизация вкрапленников из базальтов и андезит-дацитов проходила при участии двух контрастных типов магм – «бази-

товых» и кислых. На заключительных этапах вулканических процессов плагиоклаз в матриксе андезитов и дацитов формировался из других кислых расплавов с максимальным содержанием щелочей. Присутствие сингенетичных первичных расплавных и флюидных включений во вкрапленниках плагиоклаза свидетельствует о процессах фазовой сепарации кислых магм, приводившей к кристаллизации разных по составу фенокристаллов полевых шпатов при формировании дацитов. Расчетное моделирование позволило определить температуры кристаллизации вкрапленников плагиоклаза из базальтов (1160–1120 °С), андезитов (930–890 °С) и дацитов (1035–970 °С), а также температуры образования микрокристаллов из основной массы андезитов (875–810 °С) и дацитов (900–865 °С).

Работа выполнена в рамках государственного задания ИГМ СО РАН, а также при поддержке РФФ № 21-77-20022.

Литература

- Бакуменко И.Т., Томиленко А.А., Базарова Т.Ю., Ярмолюк В.В.** (1999) Об условиях формирования вулкаников Западно-Забайкальской позднемезозойской кайнозойской вулканической области (по данным изучения расплавных и флюидных включений в минералах). *Геохимия*, 12, 1352–1356.
- Дмитриева Н.В., Симонов В.А., Сафонова И.Ю., Котляров А.В., Карманов Н.С.** (2023) Физико-химические условия образования современных базальтов вулкана Локон, остров Сулавеси (Тихий океан): данные по расплавным включениям. *Тихоокеанская геология*, 42(3), 83–100.
- Добрецов Н.Л., Симонов В.А., Котляров А.В., Кулаков Р.И., Карманов Н.С.** (2016) Физико-химические параметры кристаллизации расплавов в промежуточных надсубдукционных камерах (на примере вулканов Толбачинский и Ичинский, Камчатка). *Геология и геофизика*, 57(7), 1265–1291.
- Королюк В.Н., Лаврентьев Ю.Г., Усова Л.В., Нигматулина Е.Н.** (2008) О точности электронно-зондового анализа породообразующих минералов на микроанализаторе JXA-8100. *Геология и геофизика*, 49 (3), 221–225.
- Котов А.А., Смирнов С.З., Плечов П.Ю., Персиков Э.С., Черткова Н.В., Максимович И.А., Карманов Н.С., Бухтияров П.Г.** (2021) Методика определения содержания воды в природных расплавах риолитового состава методами спектроскопии комбинационного рассеяния и электронно-зондового микроанализа. *Петрология*, 29(4), 429–448.
- Лаврентьев Ю.Г., Королюк В.Н., Усова Л.В., Нигматулина Е.Н.** (2015) Рентгеноспектральный микроанализ породообразующих минералов на микроанализаторе JXA-8100. *Геология и геофизика*, 56 (10), 1813–1824.
- Низаметдинов И.Р.** (2022) Петрогенезис посткальдерных вулкаников кальдеры Медвежья на примере вулкана Меньший Брат, о. Итуруп. *Дисс. канд. геол.-мин. наук*. Новосибирск, ИГМ СО РАН, 214 с.
- Петрографический кодекс России. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования. (2009) Издание третье / Гл. ред. О.А. Богатиков, О.В. Петров, А.Ф. Морозов. Санкт-Петербург, ВСЕГЕИ, 200 с.
- Симонов В.А.** (1993) Петрогенезис офиолитов (термобарогеохимические исследования). Новосибирск, ОИГГМ СО РАН, 247 с.
- Симонов В.А., Добрецов Н.Л., Котляров А.В., Карманов Н.С., Боровиков А.А.** (2021) Особенности кристаллизации минералов на разных стадиях развития магматизма вулкана Горелый (Камчатка): данные по расплавным и флюидным включениям. *Геология и геофизика*. 62(1), 103–133.
- Симонов В.А., Котляров А.В., Смирнов С.З., Котов А.А., Перепелов А.Б., Карманов Н.С., Боровиков А.А.** (2022) Условия образования игнимбритов вулкана Хангар (Камчатка): данные по стеклам и включениям. *Добрецовские чтения: наука из первых рук*. Новосибирск, СО РАН, 292–295.
- Соболев А.В., Слуцкий А.Б.** (1984) Состав и условия кристаллизации исходного расплава сибирских меймечитов в связи с общей проблемой ультраосновных магм. *Геология и геофизика*, 12, 97–110.
- Advokaat E.L., Hall R., White L.T., Watkinson I.M., Rudyawan A., BouDagher-Fadel K.** (2017) Miocene to recent extension in NW Sulawesi, Indonesia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 147, 378–401.
- Ariskin A.A., Barmina G.S.** (2004) COMAGMAT: Development of a magma crystallization model and its petrologic applications. *Geochemistry International*, 42 (Supp. 1), S1–S157.
- Global Volcanism Program (2022) Database volcanoes of the world v. 5.0.0. / E. Venzke (ed.). Smithsonian Institution. <https://doi.org/10.5479/si.GVP.VOTW5-2022.5.0>
- Hall R.** (2002) Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: computer-based reconstructions, model and animations. *Journal of Asian Earth Sciences*, 20, 353–431.
- Kunrat S.L.** (2017) Sopotan volcano, Indonesia: petrological systematics of volatiles and magmas and their bearing on explosive eruptions of a basalt volcano. *Dissertations and Theses*. Paper 3828. 119 p. <https://doi.org/10.15760/etd.5722>
- Kushendratno Pallister J.S., Kristianto Bina F.R., McCausland W., Carn S., Haerani N., Griswold J., Keebler R.** (2012) Recent explosive eruptions and volcano hazards at Sopotan volcano – a basalt stratovolcano in north

Sulawesi, Indonesia. *Bulletin Volcanology*, **74** (7), 1581–1609.

Maulana A., Imai A., Van Leeuwen Th., Watanabe K., Yonezu K., Nakano T., Boyce A., Page L., Schersten A. (2016) Origin and geodynamic setting of Late Cenozoic granitoids in Sulawesi, Indonesia. *Journal of Asian Earth Sciences*, **124**, 102–125.

Putirka K.D. (2008) Thermometers and barometers for volcanic systems. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, **69**(1), 61–120.

Sobolev A.V., Danyushevsky L.V. (1994) Petrology and geochemistry of boninites from the north termination of the Tonga Trench: constraints on the generation conditions of primary high-Ca boninite magmas. *Journal of Petrology*, **35**, 1183–1211.

White L.T., Hall R., Armstrong R.A., Anthony J.B., Fadel M.B., Baxter A., Wakita K., Manning C., Soesilo J. (2017) The geological history of the Latimojong region of western Sulawesi, Indonesia. *Journal of Asian Earth Sciences*, **138**, 72–91.

Zhang X.R., Huang T.-N., Chung S.-L., Maulana A., Mawaleda M., Tien C.-Y., Lee H.-Y., Liu P.-P. (2022) Late Eocene subduction initiation of the Indian Ocean in the North Sulawesi Arc, Indonesia, induced by abrupt Australian plate acceleration. *Lithos*, **422–423**, 106742.

References

Advokaat E.L., Hall R., White L.T., Watkinson I.M., Rudyawan A., BouDagher-Fadel K. (2017) Miocene to recent extension in NW Sulawesi, Indonesia. *Journal of Asian Earth Sciences*, **147**, 378–401.

Ariskin A.A., Barmina G.S. (2004) COMAGMAT: Development of a magma crystallization model and its petrologic applications. *Geochemistry International*, **42** (Suppl. 1), S1–S157.

Bakumenko I.T., Tomilenko A.A., Bazarova T.Yu., Yarmolyuk V.V. (1999) Conditions of the origin of volcanics in the late mesozoic-cenozoic Western Transbaikalia volcanic area: evidence from melt and fluid inclusions in minerals. *Geochemistry International*, **37**, 1219–1223.

Dmitrieva N.V., Simonov V.A., Safonova I.Yu., Kotlyarov A.V., Karmanov N.S. (2023) [Physicochemical conditions for the formation of recent basalts of Lokon Volcano, Sulawesi Island in the Pacific Ocean: melt inclusion data]. *Tikhookeanskaya geologiya [Russian Journal of Pacific Geology]*, **42**(3), 83–100. (in Russian)

Dobretsov N.L., Simonov V.A., Kotlyarov A.V., Kulakov R.Y., Karmanov N.S. (2016) Physicochemical parameters of crystallization of melts in intermediate suprasubduction chambers (by the example of Tolbachik and Ichinskii Volcanoes, Kamchatka Peninsula). *Russian Geology and Geophysics*, **57**(7), 993–1015.

Global Volcanism Program (2022) Database volcanoes of the world v. 5.0.0. / E. Venzke Venzke (ed.).

Smithsonian Institution. <https://doi.org/10.5479/si.GVP.VOTW5-2022.5.0>

Hall R. (2002) Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: computer-based reconstructions, model and animations. *Journal of Asian Earth Sciences*, **20**, 353–431.

Korolyuk V.N., Lavrent'ev Yu.G., Usova L.V., Nigmatulina E.N. (2008) JXA-8100 microanalyzer: accuracy of analysis of rock-forming minerals. *Russian Geology and Geophysics*, **49**(3), 165–168.

Kotov A.A., Smirnov S.Z., Plechov P.Y., Persikov E.S., Chertkova N.V., Maksimovich I.A., Karmanov N.S., Buhtiyarov P.G. (2021). Method for determining water content in rhyolitic melts by Raman spectroscopy and electron microprobe analysis. *Petrology*, **29**, 386–403.

Kunrat S.L. (2017) Soputan volcano, Indonesia: petrological systematics of volatiles and magmas and their bearing on explosive eruptions of a basalt volcano. *Dissertations and Theses*. Paper 3828. 119 p. <https://doi.org/10.15760/etd.5722>

Kushendratno Pallister J.S., Kristianto Bina F.R., McCausland W., Carn S., Haerani N., Griswold J., Keeler R. (2012) Recent explosive eruptions and volcano hazards at Soputan volcano – a basalt stratovolcano in north Sulawesi, Indonesia. *Bulletin Volcanology*, **74** (7), 1581–1609.

Lavrent'ev Yu.G., Korolyuk V.N., Usova L.V., Nigmatulina E.N. (2015) Electron probe microanalysis of rock-forming minerals with a JXA-8100 electron probe microanalyzer. *Russian Geology and Geophysics*, **56**(10), 1428–1436.

Maulana A., Imai A., Van Leeuwen Th., Watanabe K., Yonezu K., Nakano T., Boyce A., Page L., Schersten A. (2016) Origin and geodynamic setting of Late Cenozoic granitoids in Sulawesi, Indonesia. *Journal of Asian Earth Sciences*, **124**, 102–125.

Nizametdinov I.R. (2022) [Petrogenesis of post-caldera volcanic rocks of the Medvezhya caldera on Menshiy Brat volcano, Iturup Island]. *Dissertatsiya kandidata geologo-mineralogicheskikh nauk [Dissertation of Candidate of Geological and Mineralogical Sciences]*. Novosibirsk, IGM SO RAN, 214 p. (in Russian)

[Petrographic Code of Russia: Igneous, Metamorphic, Metasomatic and Impact Rocks] (2009) St. Petersburg, VSEGEI, 200 p. (in Russian)

Putirka K.D. (2008) Thermometers and barometers for volcanic systems. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, **69**(1), 61–120.

Simonov V.A. (1993) [Petrogenesis of ophiolites: thermobarogeochemical studies]. Novosibirsk, OIGGM SO RAN, 247 p. (in Russian)

Simonov V.A., Dobretsov N.L., Kotlyarov A.V., Karmanov N.S., Borovikov A.A. (2021) Features of mineral crystallization at different stages of the magmatism evolution of the Gorely volcano (Kamchatka): data on melt

and fluid inclusions. *Russian Geology and Geophysics*, **62**(1), 83–108.

Simonov V.A., Kotlyarov A.V., Smirnov S.Z., Kotov A.A., Perepelov A.B., Karmanov N.S., Borovikov A.A. (2022) [Formation conditions of ignimbrites of the Khangar volcano (Kamchatka): data on glasses and inclusions]. *Dobretsovskie chteniya: nauka iz pervaykh ruk [Dobretsov Readings: First-hand Science]*. Novosibirsk, SO RAN, 292–295. (In Russian)

Sobolev A.V., Danyushevsky L.V. (1994) Petrology and geochemistry of boninites from the north termination of the Tonga Trench: constraints on the generation conditions of primary high-Ca boninite magmas. *Journal of Petrology*, **35**, 1183–1211.

Sobolev A.V., Slutsky A.B. (1984) [Composition and crystallization conditions of the Siberian meimechites initial melt in relation with general problem of ultrabasic magmas]. *Geologiya i geofizika [Geology and Geophysics]*, **12**, 97–110. (in Russian)

White L.T., Hall R., Armstrong R.A., Anthony J.B., Fadel M.B., Baxter A., Wakita K, Manning C., Soesilo J. (2017) The geological history of the Latimojong region of western Sulawesi, Indonesia. *Journal of Asian Earth Sciences*, **138**, 72–91.

Zhang X.R., Huang T.-N., Chung S.-L., Maulana A., Mawaleda M., Tien C.-Y., Lee H.-Y., Liu P.-P. (2022) Late Eocene subduction initiation of the Indian Ocean in the North Sulawesi Arc, Indonesia, induced by abrupt Australian plate acceleration. *Lithos*, **422–423**, 106742.