

Условия формирования андезитов острова Сулавеси (Индонезия)

Н. В. Дмитриева¹, И. Ю. Сафонова^{1,2,3}, В. А. Симонов¹, А. В. Котляров¹, Н. С. Карманов¹,
И. Р. Низаметдинов¹

¹Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр. Акад. Коптюга, 3,
e-mail: kotlyarov@igm.nsc.ru

²Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, 620110, г. Екатеринбург, ул. Акад. Вонсовского, 15

³Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1

Поступила в редакцию 07.12.2022 г., принята к печати 17.02.2023 г.

Объект исследования. Андезитовые комплексы кальдеры Тондоно и вулканической постройки Локон-Эмпунг в северо-восточной части о-ва Сулавеси (Индонезия). Цель работы заключается в определении условий формирования андезитов северо-востока о-ва Сулавеси (Индонезия) на основе детальных исследований эффузивов кальдеры Тондоно и влк. Локон-Эмпунг. **Материал и методы.** Исследовалась коллекция эффузивных пород, собранная И.Ю. Сафоновой в северо-восточной части о-ва Сулавеси (Индонезия). Наряду с традиционными (петрохимическими, геохимическими и минералогическими) методами для выяснения условий формирования андезитов большое внимание уделено изучению расплавных включений, составы которых анализировались на сканирующем микроскопе MIRA 3 LMU с системой микроанализа Aztec Energy XMax 80, а также с помощью КР-спектроскопии на приборе Horiba LabRam HR800. *PT*-параметры кристаллизации вкрапленников оценены на основе данных по включениям с помощью программ из работ K.D. Putirka, F. Yavuz и D.K. Yildirim. **Результаты.** Андезиты о-ва Сулавеси формировались при участии толеитовых и известково-щелочных островодужных магм. Пироксены кристаллизовались из расплавов, эволюционировавших с накоплением щелочей и кремнезема. Для кислых магм, из которых образовались плагиоклазы, характерно уменьшение роли щелочей. Стекла в основной массе показывают участие кислых расплавов с максимальным содержанием щелочей. По данным о составе минералов и стекол (во включениях и основной массе) определены *PT*-параметры формирования андезитов. Выяснено, что пироксены кристаллизовались в двух промежуточных магматических очагах (на глубинах 27.6–14.6 и 11.3–7.2 км) при температурах от 1150 до 970°C. Образование вкрапленников плагиоклаза происходило в интервалах 930–910 и 900–890°C. Кристаллизация микрокристаллов плагиоклаза в основной массе осуществлялась при более низких температурах – 875–865, 840–810°C. **Выводы.** Андезиты о-ва Сулавеси формировались при участии островодужных расплавов, переходных от толеитов к известково-щелочным и показывающих некоторое сходство с бонинитами, что свидетельствует о возможном влиянии магматизма внутриокеанических островных дуг. Среди андезитобразующих магм выделяются (согласно результатам анализа стекол во включениях и основной массе) три разных по составу расплава. Кристаллизация пироксенов из этих расплавов происходила в двух магматических очагах на глубинах 27.6–7.2 км и при температурах 1150–970°C. Плагиоклаз образовался при более низких температурах – 930–810°C.

Ключевые слова: андезиты, вкрапленники клинопироксена, ортопироксена и плагиоклаза, расплавные включения, условия формирования, о-в Сулавеси, Индонезия

Источник финансирования

Работа выполнена в рамках государственных заданий ИГМ СО РАН (№ 122041400057-2 и 122041400044-2) и ИГГ УрО РАН, а также при поддержке РФФИ №21-77-20022

Formation conditions of andesites of Sulawesi Island (Indonesia)

Nadezhda V. Dmitrieva¹, Inna Yu. Safonova^{1,2}, Vladimir A. Simonov¹, Alexey V. Kotlyarov¹,
Nikolai S. Karmanov¹, Il'dar R. Nizametdinov¹

Для цитирования: Дмитриева Н.В., Сафонова И.Ю., Симонов В.А., Котляров А.В., Карманов Н.С., Низаметдинов И.Р. (2023) Условия формирования андезитов острова Сулавеси (Индонезия). *Литосфера*, **23**(3), 386–409. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-3-386-409>

For citation: Dmitrieva N.V., Safonova I.Yu., Simonov V.A., Kotlyarov A.V., Karmanov N.S., Nizametdinov I.R. (2023) Formation conditions of andesites of Sulawesi Island (Indonesia). *Lithosphere (Russia)*, **23**(3), 386–409. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-3-386-409>

¹V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, 3 Academician Koptyug av., Novosibirsk 630090, Russia,
e-mail: kotlyarov@igm.nsc.ru

²A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry UB RAS, 15 Academician Vonsovsky st., Ekaterinburg 620110, Russia

Received 07.12.2022, accepted 17.02.2023

Research subject. Andesitic complexes of the Tondono caldera and Lokon-Empung volcano located in the northeastern part of the Sulawesi Island (Indonesia). **Aim.** To determine the petrogenesis conditions of andesites in the northeast Sulawesi Island based on detailed studies of volcanic rocks of the Tondono caldera and Lokon-Empung volcano. **Materials and methods.** We studied volcanic rock samples collected by I.Yu. Safonova. To determine the petrogenesis conditions of andesites, conventional petrochemical, geochemical and mineralogical methods were used. Melt inclusions were also studied using a MIRA 3 LMU scanning microscope equipped with Aztec Energy XMax 80 system of microanalysis, and a Horiba LabRam HR800 Raman spectroscope. The *PT*-parameters of crystallization were estimated from the data on the composition of melt inclusions using approaches reported by K.D. Putirka, F. Yavuz and D.K. Yildirim. **Results.** The Sulawesi andesites represent tholeiitic and calc-alkaline island-arc magmas. Pyroxenes phenocrysts crystallized from melts that evolved with accumulation of alkalis and silica. Plagioclase phenocrysts crystallized from the felsic magmas, which are characterized by a decreasing role of alkalis. The composition of volcanic glass of the mesostasis suggests participation of felsic melts with a very high content of alkalis. The compositions of minerals and glasses in inclusions and in the mesostasis allowed us to estimate *PT*-parameters of the petrogenesis of the andesites. The phenocrysts of pyroxene crystallized in two intermediate magma chambers at depths of 27.6–14.6 and 11.3–7.2 km and temperatures ranging from 1150 to 970°C. The phenocrysts of plagioclase crystallized at 930–910 and 900–890°C. The microcrystals (laths) of plagioclase in the mesostasis crystallized at lower temperatures of 875–865 and 840–810°C. **Conclusions.** The andesites of the Sulawesi Island were derived from tholeiitic to calc-alkaline melts compositionally similar boninites. The compositions of the glasses in melt inclusions and mesostasis showed three types of compositionally different parental magmas, which produced the Sulawesi andesites. The phenocrysts of pyroxenes crystallized from these melts in two magma chambers at depths of 27.6 to 7.2 km and at temperatures of 1150 to 970°C. The phenocrysts and laths of plagioclase crystallized at lower temperatures of 930 to 810°C.

Keywords: andesites, phenocrysts of clinopyroxene, orthopyroxene and plagioclase, melt inclusions, petrogenesis, Sulawesi Island, Indonesia

Funding information

The work was performed on the state assignment of IGM SB RAS, with the financial support by grant No. 21-77-20022 from the Russian Science Foundation

Acknowledgements

The authors are grateful to S.K. Krivonogov for his assistance with fieldwork in Indonesia.

ВВЕДЕНИЕ

Проблемы генезиса андезитов привлекают внимание многих исследователей. Это связано с тем, что для андезитовых вулканов характерны масштабные и катастрофические извержения, приводящие к образованию крупных кальдер. Процессы кальдерообразования широко развиты в островодужных областях и вызывают особый интерес в связи с громадными объемами эксплозивного материала. При этом необходимо отметить, что исследования вулканических комплексов современных островных дуг имеют важное значение для определения параметров надсубдукционных магматических систем, совершенно необходимых в качестве эталонных данных при изучении древних эффузивных ассоциаций в складчатых областях. В связи с отмеченным расшифровка особенностей

генезиса андезитов в современных островодужных системах является важной и актуальной задачей.

В последние годы условия формирования эффузивных комплексов современных островных дуг рассматривались нами на примере Курило-Камчатской островодужной системы (Добрецов, Симонов и др., 2016, 2017, 2019; Низаметдинов и др., 2017, 2019; Симонов и др., 2021; Низаметдинов, 2022), находящейся в северной части Тихоокеанского вулканического пояса. Несомненно, представляет большой интерес сравнительный анализ полученных результатов по северным островным дугам с данными по островодужному магматизму на юге Тихого океана.

В качестве эталонного южного объекта выбран о-в Сулавеси (Индонезия), входящий в состав одноименной островной дуги (рис. 1). Несколько зон субдукции и сложные границы плит, а также сосу-

ществование разных островных дуг делают выяснение условий андезитового вулканизма в этом регионе весьма затруднительным.

Вулканическая дуга Сулавеси образована над зоной субдукции Северный Сулавеси, что предполагает ее внутриокеаническое происхождение. При этом, по геологическим данным, о-в Сулавеси разделяется на молодую северную часть, известную многочисленными проявлениями современного вулканизма, и южную часть, построенную на более древнем, метаморфизованном основании. В связи с этим происхождение о-ва Сулавеси до сих пор является предметом дискуссий.

Исследования образцов вулканогенных пород, отобранных И.Ю. Сафоновой, позволили получить новые петрохимические, геохимические, минералогические и термобарогеохимические данные и выяснить условия формирования андезит-базальтовых комплексов о-ва Сулавеси (Индонезия). Основное внимание было уделено андезитам северо-востока о-ва Сулавеси, входящим в состав кальдеры Тондоно и вулканической постройки Локон-Эмпунг (см. рис. 1).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основой для выяснения условий формирования андезитов послужила коллекция эффузивных пород, собранная в северо-восточной части о-ва Сулавеси (Индонезия). Исследования образцов проведены в Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск), ЦКП “Геоаналитик” Института геологии и геохимии им. А.Н. Заварицкого (ИГГ УрО РАН, г. Екатеринбург), а также в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (г. Новосибирск).

Петрохимические составы пород о-ва Сулавеси определены с помощью рентгенофлуоресцентного метода на спектрометре ARL-9900-XP фирмы Thermo Electron Corporation. Для контроля использованы государственные стандартные образцы горных пород (MU-1, CT-1A и др.). Диапазоны определяемых содержаний следующие, мас. %: Na_2O – 0.04–15, MgO – 0.05–45, Al_2O_3 – 0.01–30, SiO_2 – 0.01–100, P_2O_5 – 0.01–2, K_2O – 0.01–10, CaO – 0.01–40, TiO_2 – 0.01–2, MnO – 0.01–2, Fe_2O_3 – 0.01–20, BaO – 0.005–0.5, п.п.п. – 0.2–30.

Содержания редких и редкоземельных элементов установлены методом ICP-MS (масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой) на масс-спектрометре Finnigan Element. Пределы обнаружения для большинства редких и редкоземельных элементов составляют от 0.01 до 0.06, для Eu, Ho, Lu – 0.003, для высокозарядных элементов – 0.09–0.22 г/т.

Вкрапленники клино- и ортопироксенов, а также плагиоклаза из эффузивных пород о-ва Сула-

веси анализировались микрорентгеноспектральным методом, с помощью микроанализатора JEOL JXA-8100 SuperProbe (Королук и др., 2008). Результаты проведенных нами анализов содержаний основных элементов на этом приборе превышают пределы обнаружения. В связи с этим установленные количества элементов являются достоверными.

Составы гомогенных стекол прогретых включений и минералов около включений (а также составы микрокристаллов плагиоклаза и природного стекла в основной массе андезита) определены на сканирующем электронном микроскопе MIRA 3 LMU (Tescan Orsay Holding) с системой микроанализа Aztec Energy XMax 80 (Oxford Instruments Nanoanalysis Ltd) при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе электронного пучка 1.5 нА и живом времени набора спектров 20 с. 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. % лежит в диапазоне 2–6 отн. % и обычно 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 растра с размером сканируемой площади не менее 3×3 мкм.

Исследования методами термобарогеохимии расплавных включений в минералах из эффузивов о-ва Сулавеси выполнены в лаборатории геодинамики и магматизма ИГМ СО РАН. Эксперименты по гомогенизации расплавных включений при высоких температурах проводились в микротермокамере с инертной средой конструкции (Соболев, Слуцкий, 1984) с применением имеющихся методик (Симонов, 1993; Sobolev, Danyushevsky, 1994; и др.).

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

В целях определения роли летучих компонентов в расплаве стекла прогретых расплавных включений анализировались методом КР-спектроскопии на приборе Horiba LabRam HR800 в ИГМ СО РАН, г. Новосибирск. Для уточнения и верификации

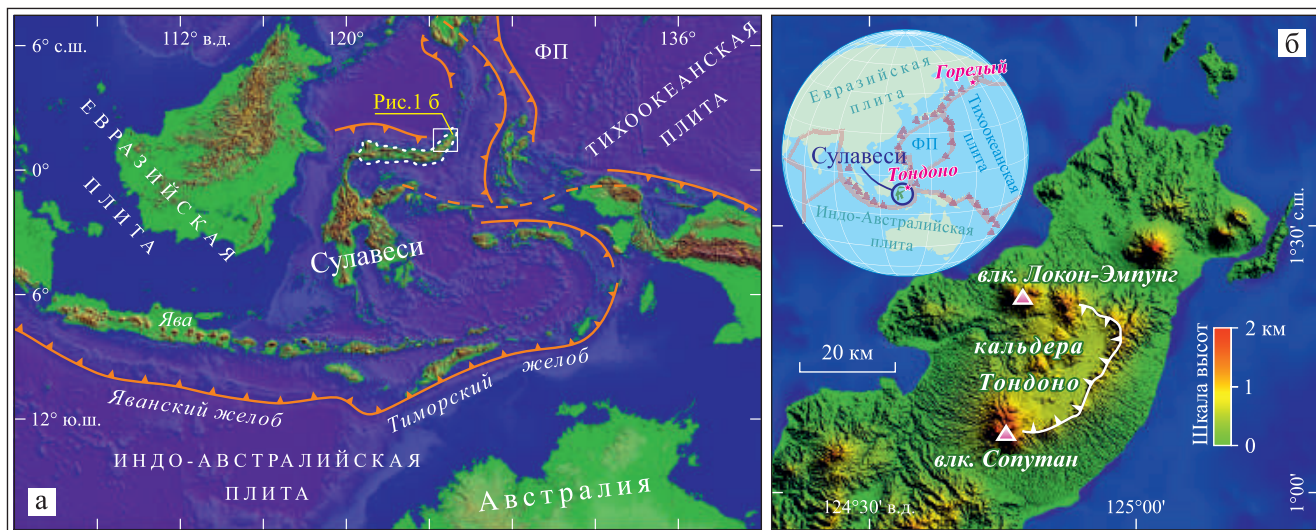


Рис. 1. Тектоническая схема Индонезийского архипелага (а) и положение кальдеры Тондоно на северо-востоке о-ва Сулавеси (б).

Рисунок построен с использованием данных из работ (Hall, 2002; Kushendratno et al., 2012). Цифровая модель рельефа взята с сайта *gmrt.org*. Пунктиром показана граница островной дуги Северного Сулавеси. ФП – Филиппинская плита.

Fig. 1. Tectonic scheme of the Indonesian archipelago (a), and the position of the Tondono caldera in the northeast of the island of Sulawesi (b).

The figure was constructed using data from (Hall, 2002; Kushendratno et al., 2012). The digital elevation model was taken from *gmrt.org*. The dotted line shows the boundary of the North Sulawesi island arc. ФП – Philippine plate.

полученных данных по количеству H_2O в стеклах использовалось сочетание КР-спектроскопии и РСМА согласно методике, описанной в работе (Котов и др., 2021).

Для определения *PT*-условий кристаллизации вкрапленников пироксена применена программа WinPLtb, основанная на соотношениях составов пироксена и расплава, из которого он кристаллизуется (Clinopyroxene-Liquid Thermobarometry) (Yavuz, Yildirim, 2018). Состав расплава оценен на основе анализа стекол прогретых гомогенизированных включений в изученных пироксенах из андезитов.

Температуры кристаллизации плагиоклаза рассчитаны по 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 находящимся между ними природным стеклам в основной массе андезита.

ГЕОЛОГО-ПЕТРОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЭФфуЗИВНЫХ КОМПЛЕКСОВ о-ва СУЛАВЕСИ

Остров Сулавеси (Индонезия) имеет сложную геологическую историю развития, что связано с его положением в области коллизии четырех литосферных плит – Индо-Австралийской, Тихо-

океанской, Филиппинской и Евразийской. Он образовался в результате столкновения террейнов Азиатской (западная часть острова) и Австралийской (юго-восточная часть острова) плит, а также островной дуги (см. рис. 1а).

По структурно-тектоническим особенностям остров можно разделить на два сегмента: южный, в строении фундамента которого участвуют относительно древние (раннемеловые) континентальные блоки, и северный – с молодой (современной) корой островодужного типа. В основании южного сегмента распространены метаморфические ассоциации. На западе они прорываются кайнозойскими магматическими образованиями, а с востока их перекрывают офиолиты. Северный сегмент представлен преимущественно миоцен-плиоценовыми эффузивными комплексами островной дуги Северного Сулавеси. На ее северо-восточном окончании находятся современные активные вулканические постройки, цепочка которых прослеживается до южного окончания Филиппинской дуги (Hall, 2002; White et al., 2017; Zhang et al., 2022).

Среди эффузивных комплексов северо-востока о-ва Сулавеси нами исследовались образцы андезитов, отобранные из структур кальдеры Тондоно и вулканической постройки Локон-Эмпунг (см. рис. 1б). Кальдера Тондоно представляет собой четвертичную полигенную вулканотектоническую структуру. В настоящее время она является самой

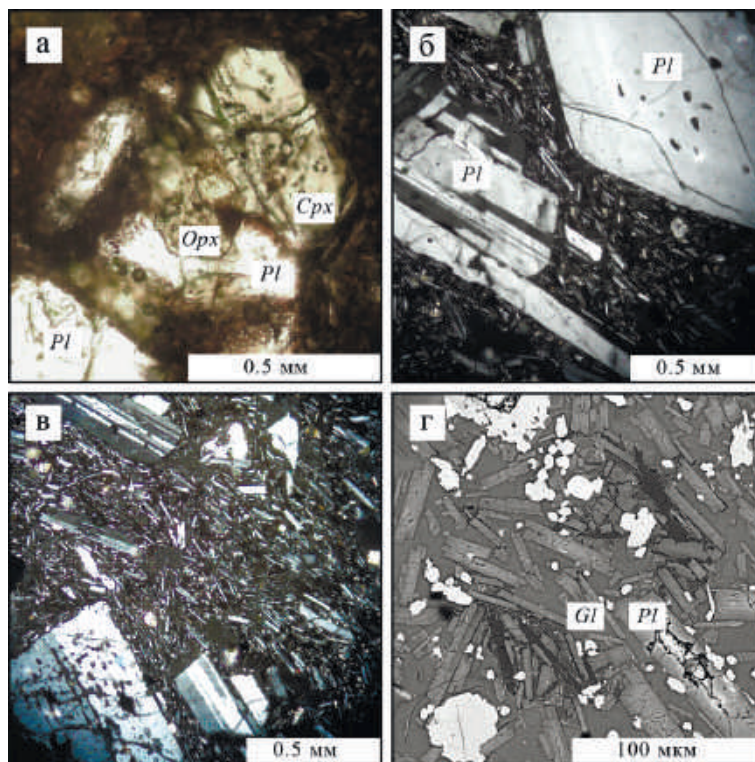


Рис. 2. Многофазные (а) и однофазные (б) вкрапленники в андезите о-ва Сулавеси (проходящий свет) и строение основной массы андезита (в, г; в – проходящий свет, г – вид в отраженных электронах).

Cpx – клинопироксен, *Opx* – ортопироксен, *Pl* – плагиоклаз, *Gl* – стекло.

Fig. 2. Multiphase (a) and single-phase (б) phenocrysts in andesite of the Sulawesi Island (transmitted light) and structure of the groundmass of andesite (в, г; в – transmitted light, г – view in reflected electrons).

Cpx – clinopyroxene, *Opx* – orthopyroxene, *Pl* – plagioclase, *Gl* – glass.

крупной кальдерой на севере острова и ее размеры составляют примерно 20×30 км. Посткальдерная стадия связана с формированием голоценовых андезит-базальтовых стратовулканов (Сопутан, Локон-Эмпунг, Махаву и др.), расположенных на южной и северной границах кальдеры. Вулканический комплекс Локон-Эмпунг включает в себя четыре вершины и небольшой активный кратер размером 150×250 м, расположенный в седловине между вершинами Локон и Эмпунг. Начиная с 1829 г. из кратера происходят извержения, сопровождающиеся выбросами небольшого количества тefры, ростом лавовых куполов и пирокластическими потоками (Global Volcanism Program..., 2022).

Наиболее детально изученные нами андезиты кальдеры Тондоно (северо-восток о-ва Сулавеси) сложены микрозернистой основной массой, в которой находятся два главных типа вкрапленников. Первый – это фактически многофазные сростки, состоящие из равномернозернистой ассоциации орто- и клинопироксенов, а также плагиоклаза (рис. 2а). Вторым тип широко представлен другими (монофазными) крупными фенокристаллами плагиоклаза (рис. 2б).

Основная масса изученного андезита весьма выдержана по своей структуре и составу. Вторичные изменения практически отсутствуют, и мы наблюдаем свежее стекло, в котором находятся микролейсты плагиоклаза (рис. 2в, г). Их расположение достаточно закономерно. В одних случаях лейсты показывают зональное строение стекловатой матрицы с обтеканием расплавом вокруг многофазных вкрапленников, в других – в основной массе около мономинеральных вкрапленников плагиоклаза по ориентировке микролейст плагиоклаза в свежем стекле хорошо видно течение расплава между крупными кристаллами (рис. 2в).

ПЕТРОХИМИЧЕСКИЕ СОСТАВЫ АНДЕЗИТОВ о-ва СУЛАВЕСИ

Основой изучения петрохимических особенностей андезитов северо-востока о-ва Сулавеси послужили оригинальные результаты обработки собранной коллекции (табл. 1) – ее сравнительный анализ с данными по известным островодужным объектам. Прежде всего, это представители при-

Таблица 1. Представительные анализы андезитов о-ва Сулавеси, мас. %

Table 1. Representative analyses of andesites of Sulawesi Island, wt %

№ п.п.	№ обр.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	П.п.п.	Сумма
1	Ind-01-18	56.81	0.79	17.63	8.86	0.17	3.56	7.60	3.34	0.98	0.15	-0.31	99.67
2	Ind 08-18	58.93	0.86	16.15	7.61	0.15	3.00	6.14	3.19	1.88	0.21	0.98	99.20
3	Ind 09-18	60.07	0.92	15.34	8.30	0.15	2.91	5.83	3.23	1.93	0.19	0.46	99.42
4	Ind-10-18	59.82	0.88	16.33	7.92	0.14	2.80	6.13	3.34	1.91	0.21	0.04	99.63
5	Ind 11-18	59.95	0.86	16.18	8.11	0.15	2.74	6.10	3.30	1.93	0.20	0.46	100.08
6	Ind-13-18	59.50	0.86	16.16	7.93	0.13	2.70	6.11	3.40	1.98	0.21	0.06	99.11
7	Ind 14-18	59.64	0.74	16.65	7.76	0.14	3.05	6.46	3.32	1.39	0.13	0.22	99.58
8	Ind-15-18	58.38	0.72	16.78	7.76	0.15	3.38	7.19	3.16	1.30	0.14	0.45	99.49
9	Ind-17-18	59.68	0.83	16.16	7.89	0.15	2.94	6.42	3.40	1.98	0.20	0.08	99.82
10	Ind-19-18	61.47	0.87	16.01	7.74	0.16	2.00	5.77	3.94	1.13	0.16	-0.09	99.24
11	Ind 20-18	58.29	0.71	16.75	7.90	0.15	3.36	7.20	3.16	1.30	0.13	0.45	99.48
12	Ind-21-18	60.09	0.74	16.51	7.78	0.14	2.97	5.98	3.26	1.43	0.13	0.38	99.48

митивных (Идзу-Бонинская дуга) и развитых (Курило-Камчатская дуга) островных дуг. К последним относится хорошо изученный влк. Горелый на Камчатке (Симонов и др., 2021; Gavrilenko и др., 2016), среди структур которого выделяются (как и в случае северо-востока о-ва Сулавеси) собственно вулканические постройки стратовулканов и более древняя кальдера.

На диаграмме (Na₂O + K₂O) – SiO₂ все рассмотренные составы андезитов северо-востока о-ва Сулавеси располагаются в области пород нормальной щелочности вблизи с полем бонинитов примитивной Идзу-Бонинской островной дуги. При этом эффузивы о-ва Сулавеси отличаются от пород влк. Горелый из развитой Курило-Камчатской островной дуги, содержащих заметно больше щелочей (рис. 3а). Сходство андезитов одновременно с бонинитами Идзу-Бонинской островной дуги и эффузивами Камчатки отмечается и по другим химическим компонентам (рис. 3б, в). По соотношению FeO*/MgO–SiO₂ андезиты о-ва Сулавеси располагаются преимущественно по границе толеитовой и известково-щелочной серий. На диаграмме K₂O/Na₂O–SiO₂ рассмотренные андезиты о-ва Сулавеси находятся в области калиево-натриевой серии, где присутствуют и эффузивы влк. Горелый. Следует отметить, что часть изученных андезитов попадает в поле бонинитов Идзу-Бонинской островной дуги.

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ АНДЕЗИТОВ о-ва СУЛАВЕСИ

Особенности геохимии андезитов рассмотрены на основе результатов исследования образцов эффузивов, собранных в северо-восточной части

о-ва Сулавеси. Оригинальные данные по содержанию редких и редкоземельных элементов андезитов приведены в табл. 2 и 3. Характерные черты поведения редких элементов в андезитах о-ва Сулавеси хорошо видны на диаграмме Y–Zr (рис. 4). Здесь рассмотренные породы большей частью совпадают с эффузивами влк. Горелый на Камчатке, располагаясь фактически вдоль единого тренда накопления обоих редких элементов в условиях развитой островодужной системы. В то же время часть эффузивов северо-востока о-ва Сулавеси содержит минимум элементов и контактирует с полем бонинитов Идзу-Бонинской островной дуги, свидетельствуя о развитии на определенном этапе формирования о-ва Сулавеси магматических систем примитивных островных дуг (см. рис. 4).

На диаграмме Nb/Y–Zr/Y эффузивы о-ва Сулавеси находятся в области без плюмового источника. Практически все андезиты (как и вулканы влк. Горелый) располагаются в поле островодужных пород. При этом значительная часть эффузивов о-ва Сулавеси приурочена к полю бонинитов (рис. 5). По соотношению Zr/Nb–Nb/Th все рассмотренные эффузивы северо-востока о-ва Сулавеси и влк. Горелый (Камчатка) находятся в поле островодужных пород. Графики распределения редкоземельных элементов для андезитов северо-востока о-ва Сулавеси близки между собой, показывают накопление легких компонентов. В целом спектры изученных эффузивов совпадают (в том числе и европиевые минимумы) с графиками для андезитов известково-щелочной серии (рис. 6), свидетельствуя о действии магматизма развитой островной дуги при формировании эффузивных комплексов северо-востока о-ва Сулавеси.

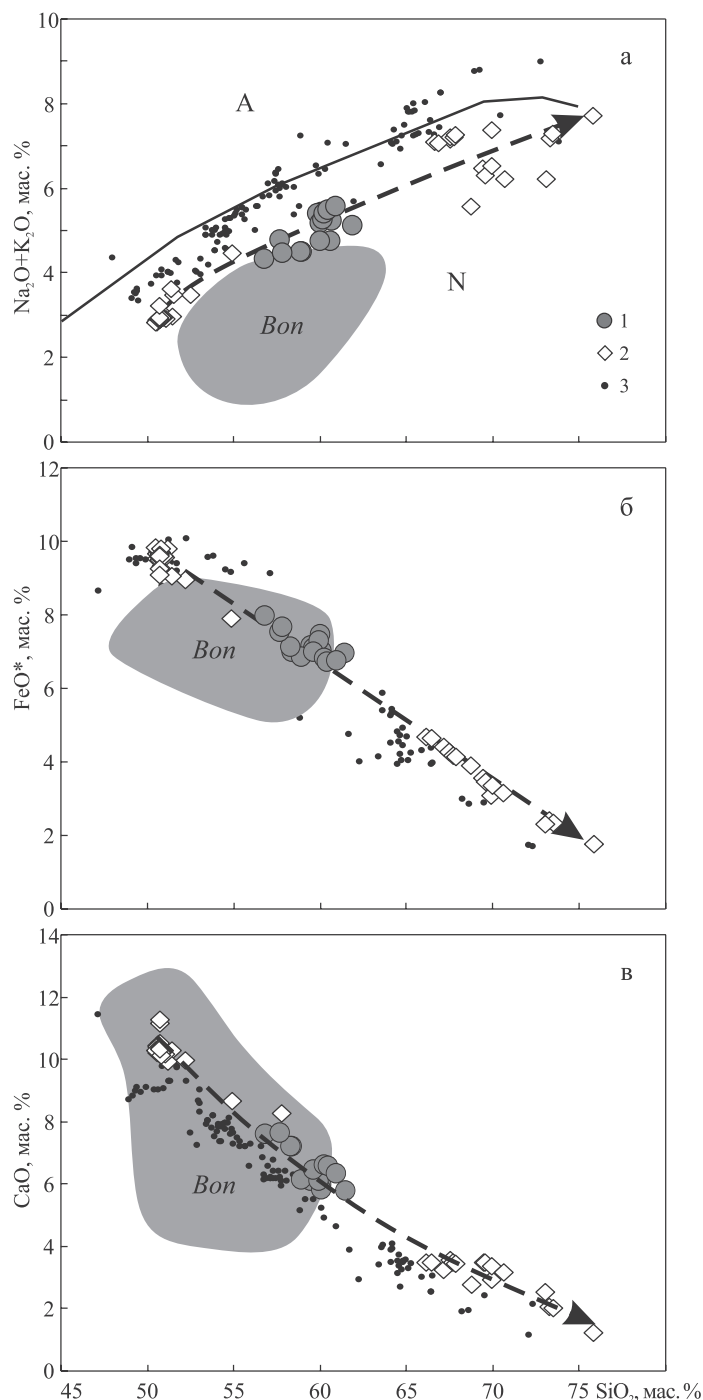


Рис. 3. Диаграммы $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})-\text{SiO}_2$, $\text{FeO}^*-\text{SiO}_2$, $\text{CaO}-\text{SiO}_2$ для андезитов о-ва Сулавеси (1), эффузивных пород северо-востока о-ва Сулавеси (2) и эффузивов влк. Горелый, Камчатка (3).

Рисунок построен на основе оригинальных данных с использованием материалов из работ (Петрографический кодекс России..., 2009; Arculus et al., 1992; Murton et al., 1992; Kushendratno et al., 2012; Gavrilenko и др., 2016). *Bon* – поле бонинитов Идзу-Бонинской островной дуги. Породы: А – щелочные, N – нормальной щелочности. Составы пород приведены к 100%. FeO^* – общее железо.

Fig. 3. Diagrams $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})-\text{SiO}_2$, $\text{FeO}^*-\text{SiO}_2$, $\text{CaO}-\text{SiO}_2$ for andesites of the Sulawesi Island (1), effusive rocks of the northeast of the Sulawesi Island (2) and effusive rocks of the Gorely volcano, Kamchatka (3).

The figure was constructed on the basis of original data using materials from works (Petrographic Code of Russia..., 2009; Arculus et al., 1992; Murton et al., 1992; Kushendratno et al., 2012; Gavrilenko et al., 2016). *Bon* – the boninite field of the Izu-Bonin island arc. Rocks: A – alkaline, N – normal alkalinity. Rock compositions are recalculated by 100%. FeO^* is total iron.

СОСТАВЫ МИНЕРАЛОВ-ВКРАПЛЕННИКОВ В АНДЕЗИТАХ о-ва СУЛАВЕСИ

У минералов-вкрапленников в андезитах о-ва Сулавеси анализировались преимущественно участки около находящихся в них расплавных включений. С учетом важности данных по составам минералов для выяснения условий магматических систем также проанализированы не содержащие включения клино- и ортопироксены (и сосуществующие с ними плагиоклазы) из многофазных вкрапленников.

Клинопироксены в андезитах о-ва Сулавеси обычно совместно с ортопироксенами входят в состав многофазных вкрапленников. Судя по их взаимоотношениям (см. рис. 2а), эти пироксены кристаллизовались, скорее всего, одновременно. При этом ассоциирующие с пироксенами плагиоклазы ведут себя более независимо. Составы изученных вкрапленников клинопироксена приведены в табл. 4. По соотношению минералов (En-Wo-Fs) вкрапленники клинопироксена в андезитах о-ва Сулавеси относятся к авгиту.

Вкрапленники клинопироксена являются хорошими индикаторами геодинамической обстановки формирования эффузивов. Для этого используются многочисленные диаграммы, часть из которых прошла проверку на реальных эталонных объектах. По соотношению $\text{SiO}_2/100-\text{TiO}_2-\text{Na}_2\text{O}$ клинопироксены из андезитов о-ва Сулавеси располагаются компактной группой, перекрывая поля минералов из известково-щелочных и толеитовых пород островных дуг. На диаграмме TiO_2-FeO клинопироксены из андезитов о-ва Сулавеси находятся в области пироксенов из эффузивов островных дуг. При этом часть из них попадает в поле клинопироксенов из бонинитов (рис. 7), что свидетельствует о возможном участии магматизма примитивных внутриокеанических островных дуг при формировании андезитов о-ва Сулавеси. По содержанию целого ряда других элементов (Ti, Cr, Ca, Al) клинопироксены из андезитов о-ва Сулавеси показывают явно островодужную геодинамическую обстановку и развитие переходных серий от толеитов к известково-щелочным.

Таблица 2. Содержание редких элементов в андезитах о-ва Сулавеси, г/т

Table 2. Content of rare elements in andesites of Sulawesi Island, ppm

№ п.п.	№ обр.	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Cs	Ba	Hf	Ta	Th	U
1	Ind-01-18	15.3	366	25	78	2.3	1.00	166	2.1	0.24	1.17	0.30
2	Ind-08-18	46	308	29	144	4.6	2.3	241	3.9	0.32	5.0	1.02
3	Ind-09-18	49	295	31	152	4.7	2.4	250	4.3	0.31	5.3	1.09
4	Ind-11-18	46	304	31	149	4.6	2.2	247	4.1	0.31	5.3	1.06
5	Ind-14-18	33	231	26	119	3.5	2.0	199	3.2	0.24	2.9	0.69
6	Ind-15-18	30	249	30	112	3.3	1.76	187	3.0	0.24	2.9	0.62
7	Ind-17-18	49	296	31	150	4.6	2.4	249	4.0	0.36	5.4	1.12
8	Ind-20-18	30	254	26	111	3.2	1.72	188	3.0	0.20	2.8	0.59
9	Ind-21-18	33	236	28	125	3.5	1.31	206	3.3	0.28	3.1	0.71

Таблица 3. Содержание редкоземельных элементов в андезитах о-ва Сулавеси, г/т

Table 3. Content of rare-earth elements in andesites of Sulawesi Island, ppm

№ п.п.	№ обр.	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
1	Ind-01-18	7.1	17.5	2.4	10.8	2.9	1.03	3.5	0.63	4.1	0.85	2.5	0.40	2.5	0.39
2	Ind-08-18	12.7	30	3.8	17.3	4.2	1.08	4.4	0.76	4.7	1.02	3.0	0.48	3.0	0.47
3	Ind-09-18	13.2	31	4.0	17.9	4.4	1.12	4.7	0.81	4.8	1.06	3.2	0.49	3.2	0.47
4	Ind-11-18	12.9	30	4.0	17.0	4.4	1.16	4.8	0.79	5.1	1.06	3.0	0.49	3.1	0.47
5	Ind-14-18	8.6	19.8	2.7	12.8	3.6	0.96	3.9	0.70	4.5	0.91	2.7	0.43	2.8	0.41
6	Ind-15-18	9.5	25	3.4	16.2	4.2	1.09	4.7	0.81	5.1	1.10	3.3	0.51	3.1	0.47
7	Ind-17-18	13.3	31	4.2	17.6	4.8	1.06	4.6	0.81	5.3	1.12	3.2	0.51	3.3	0.49
8	Ind-20-18	8.2	21	2.8	13.0	3.3	0.98	3.7	0.66	4.1	0.92	2.8	0.42	2.8	0.42
9	Ind-21-18	8.4	21	2.8	12.6	3.7	0.90	4.1	0.72	4.5	0.96	2.8	0.44	2.9	0.44

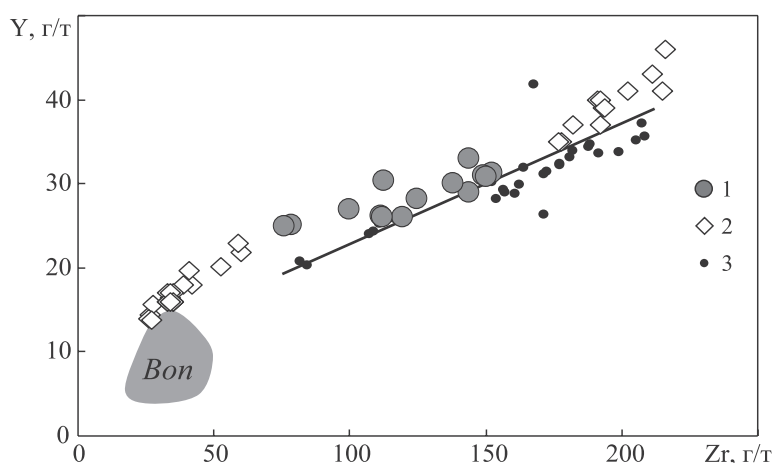


Рис. 4. Диаграмма Y–Zr для андезитов о-ва Сулавеси (1), эффузивных пород северо-востока о-ва Сулавеси (2) и эффузивов влк. Горелый, Камчатка (3).

Рисунок построен на основе оригинальных данных с использованием материалов из работ (Arculus et al., 1992; Murton et al., 1992; Kushendratno et al., 2012; Gavrilenko и др., 2016; Kunrat, 2017). Bon – поле бонинитов Идзу-Бонинской островной дуги.

Fig. 4. Y–Zr diagram for effusives for andesites of the Sulawesi Island (1), effusive rocks of the northeast of the Sulawesi Island (2) and effusive rocks of the Gorely volcano, Kamchatka (3).

The figure was constructed on the basis of original data using materials from works (Arculus et al., 1992; Murton et al., 1992; Kushendratno et al., 2012; Gavrilenko et al., 2016; Kunrat, 2017). Bon – is the boninite field of the Izu-Bonin island arc.

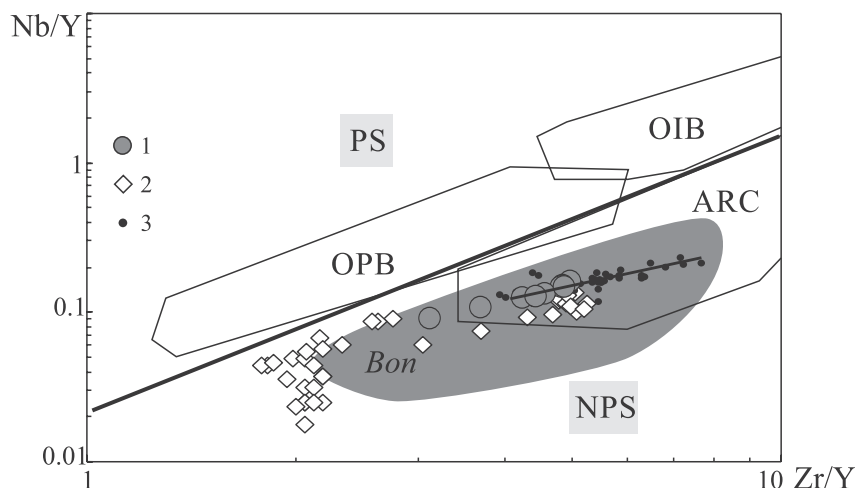


Рис. 5. Диаграмма Nb/Y–Zr/Y для андезитов о-ва Сулавеси (1), эффузивных пород северо-востока о-ва Сулавеси (2) и эффузивов влк. Горелый, Камчатка (3).

Рисунок построен на основе оригинальных данных с использованием материалов из работ (Arculus et al., 1992; Murton et al., 1992; Condie, 2005; Kushendratno et al., 2012; Gavrilenko и др., 2016; Kunrat, 2017). PS – области пород с плюмовым источником, NPS – без него. Поля пород: Bon – бониниты Идзу-Бонинской островной дуги, OPB – океанические плато-базальты, OIB – базальты внутриплитных океанических островов, ARC – базальты островных дуг.

Fig. 5. Diagram Nb/Y–Zr/Y for andesites of the Sulawesi Island (1), effusive rocks of the northeast of the Sulawesi Island (2) and effusive rocks of the Gorely volcano, Kamchatka (3).

The figure was constructed on the basis of original data using materials from works (Arculus et al., 1992; Murton et al., 1992; Condie, 2005; Kushendratno et al., 2012; Gavrilenko et al., 2016; Kunrat, 2017). PS – rock areas with a plume source, NPS – without a plume source. Rock fields: Bon – boninites of the Izu-Bonin island arc, OPB – oceanic plateau basalts, OIB – intraplate oceanic island basalts, ARC – island arc basalts.

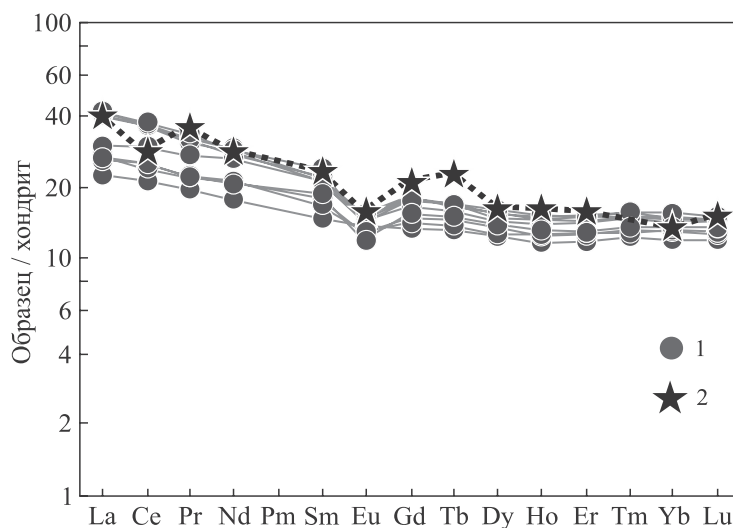


Рис. 6. Распределение редкоземельных элементов в андезитах о-ва Сулавеси.

1 – оригинальные анализы андезитов о-ва Сулавеси, 2 – андезиты известково-щелочной серии (Кузьмин, 1985). Значения элементов нормированы по хондриту согласно (Boynnton, 1984).

Fig. 6. Distribution of rare earth elements in andesites of the Sulawesi Island.

1 – original analyzes of andesites from the Sulawesi Island, 2 – andesites of the calc-alkaline series (Kuz'min, 1985). Element values are normalized to chondrite according to (Boynnton, 1984).

Ортопироксены из андезитов о-ва Сулавеси (табл. 5) по соотношению миналов (En-Wo-Fs) отно-

сятся к гиперстену. Судя по отношениям TiO_2 – $Mg\#$ и Al_2O_3 – $Mg\#$, ортопироксены из андезитов о-ва Су-

Таблица 4. Представительные анализы вкрапленников клинопироксена из андезитов о-ва Сулавеси, мас. %

Table 4. Representative analyses of clinopyroxene phenocrysts from andesites of Sulawesi Island, wt %

№ 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	121	52.07	0.30	1.01	0.00	10.70	0.59	14.41	20.12	0.33	0.00	99.52
2	123	51.93	0.29	0.98	0.02	11.09	0.64	14.17	19.94	0.31	0.00	99.37
3	125	52.15	0.30	1.00	0.00	10.61	0.62	14.27	20.30	0.35	0.00	99.61
4	128	51.03	0.43	1.89	0.01	9.82	0.35	15.41	20.03	0.30	0.00	99.26
5	130	50.72	0.48	2.24	0.03	9.46	0.33	15.56	20.09	0.30	0.00	99.21
6	135	52.22	0.35	1.03	0.01	10.62	0.51	14.16	20.01	0.26	0.00	99.17
7	137	51.19	0.48	2.46	0.03	10.88	0.46	13.54	20.04	0.37	0.00	99.44
8	143	51.43	0.39	2.12	0.05	9.75	0.34	16.01	18.91	0.25	0.00	99.24
9	144	50.99	0.44	1.92	0.01	9.40	0.31	15.48	19.75	0.24	0.00	98.54
10	147	51.74	0.30	0.93	0.00	10.78	0.60	14.30	20.16	0.25	0.01	99.07
11	148	52.05	0.30	1.03	0.00	10.44	0.54	14.46	20.36	0.28	0.00	99.45
12	152	49.19	0.51	2.27	0.02	10.74	0.50	14.28	20.22	0.33	0.00	98.07
13	153	50.51	0.36	1.18	0.01	10.60	0.49	14.75	20.12	0.30	0.00	98.31
14	163	51.59	0.38	1.50	0.02	10.21	0.44	14.40	20.19	0.33	0.00	99.05
15	165	51.60	0.33	1.24	0.00	11.01	0.55	13.88	19.93	0.25	0.00	98.78
16	167	51.43	0.45	1.88	0.02	9.63	0.36	14.95	19.99	0.30	0.01	99.00
17	169	52.74	0.43	1.90	0.01	9.55	0.35	13.91	19.91	0.33	0.00	99.11
18	170	49.86	0.35	1.23	0.01	11.19	0.57	12.88	19.67	0.30	0.00	96.07
19	183	51.75	0.44	1.81	0.00	9.77	0.37	14.91	19.98	0.28	0.00	99.32
20	184	51.36	0.50	2.37	0.08	9.90	0.36	14.56	20.13	0.32	0.00	99.58
21	190	52.76	0.36	1.22	0.01	10.63	0.53	13.69	19.91	0.32	0.00	99.42
22	191	52.31	0.39	1.42	0.01	10.07	0.47	14.06	20.09	0.33	0.00	99.15
23	194	52.75	0.29	1.03	0.01	11.15	0.62	13.27	20.08	0.34	0.00	99.53
24	203	51.48	0.40	1.78	0.02	9.37	0.30	15.22	19.93	0.27	0.00	98.77
25	205	50.81	0.31	1.01	0.02	10.64	0.56	14.85	20.35	0.24	0.00	98.78
26	207	51.07	0.29	0.98	0.00	10.40	0.55	14.91	20.42	0.34	0.00	98.97
27	209	49.72	0.55	2.56	0.04	10.69	0.48	14.06	20.46	0.36	0.01	98.92
28	210	51.20	0.37	1.21	0.00	10.57	0.50	14.88	20.03	0.27	0.01	99.03
29	212	51.96	0.42	1.92	0.03	9.80	0.35	15.01	19.96	0.30	0.00	99.74
30	214	51.71	0.42	1.93	0.00	10.26	0.41	14.47	19.87	0.34	0.00	99.39
31	215	53.31	0.33	1.24	0.01	11.26	0.53	13.03	19.82	0.25	0.00	99.77
32	88	51.27	0.55	2.28	0.00	10.88	0.49	14.00	20.54	0.00	0.00	100.01
33	89	52.12	0.32	1.19	0.00	10.89	0.50	14.49	20.48	0.00	0.00	99.99
34	90	52.03	0.48	1.33	0.00	10.75	0.54	14.15	20.72	0.00	0.00	100.00
35	107	51.63	0.48	1.68	0.00	11.49	0.40	14.30	20.02	0.00	0.00	100.00
36	108	52.01	0.41	1.83	0.00	10.60	0.40	14.58	20.17	0.00	0.00	100.00
37	109	51.63	0.40	2.20	0.00	10.27	0.32	14.41	20.78	0.00	0.00	100.01
38	139	51.28	0.52	1.88	0.00	11.15	0.49	13.81	20.52	0.34	0.00	99.99
39	140	51.95	0.37	1.32	0.00	10.75	0.47	14.44	20.39	0.31	0.00	100.00
40	141	51.26	0.45	2.11	0.00	11.15	0.50	14.02	20.16	0.35	0.00	100.00

Примечание. 1–31 – составы клинопироксена из многофазных вкрапленников, 32–40 – составы клинопироксена из многофазных вкрапленников рядом с расплавленными включениями.

Note. 1–31 – compositions of clinopyroxene from polyphase phenocrysts, 32–40 – compositions of clinopyroxene from polyphase phenocrysts near melt inclusions.

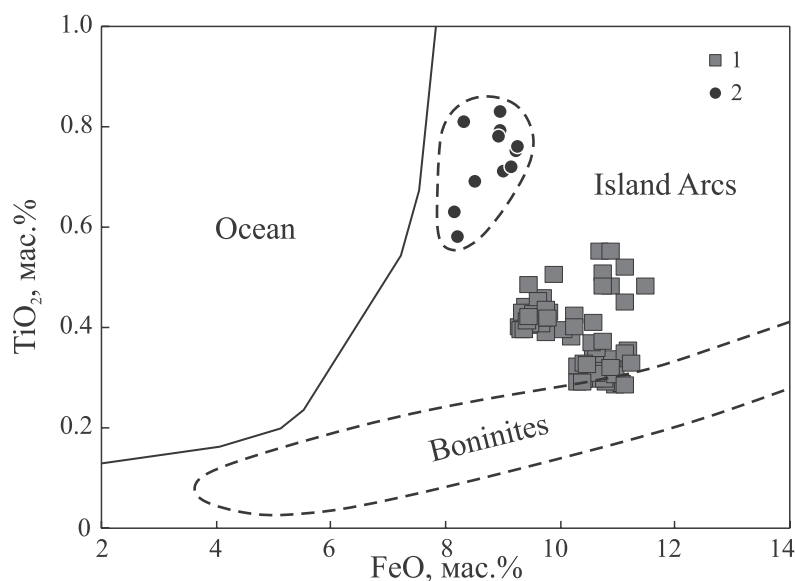


Рис. 7. Диаграмма TiO_2 – FeO для вкрапленников клинопироксена.

Рисунок построен на основе оригинальных данных с использованием материалов из работ (Куренков и др., 2002; Симонов и др., 2021). 1 – клинопироксены из андезитов о-ва Сулавеси, 2 – из базальтовых пород влк. Горелый. Поля клинопироксенов: Ocean – из океанических эффузивных пород, Island Arcs – из островодужных эффузивных пород, Boninites – из бонинитов.

Fig. 7. TiO_2 – FeO diagram for clinopyroxene phenocrysts.

The figure was constructed on the basis of original data using materials from works (Kurenkov et al., 2002; Simonov et al., 2021). 1 – clinopyroxenes from andesites of Sulawesi Island, 2 – from basaltic rocks of the Gorely Volcano. Clinopyroxene fields: Ocean – from oceanic effusive rocks, Island Arcs – from island-arc effusive rocks, Boninites – from boninites.

Таблица 5. Представительные анализы вкрапленников ортопироксена из андезитов о-ва Сулавеси, мас. %

Table 5. Representative analyses of orthopyroxene phenocrysts from andesites of Sulawesi Island, wt %

№ п.п.	№ анализа	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Cr_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	Сумма
1	116	51.51	0.19	0.53	0.00	21.34	0.94	23.64	1.43	0.02	0.00	99.61
2	118	51.78	0.19	0.54	0.01	21.62	0.95	23.71	1.39	0.00	0.00	100.19
3	120	51.82	0.21	0.56	0.01	21.65	0.89	23.52	1.42	0.01	0.00	100.09
4	155	53.01	0.19	0.69	0.01	21.65	0.89	22.72	1.47	0.02	0.00	100.64
5	157	53.40	0.22	0.68	0.00	20.39	0.85	23.66	1.50	0.01	0.00	100.72
6	159	52.83	0.22	1.13	0.01	18.50	0.63	24.64	1.55	0.04	0.00	99.54
7	171	54.23	0.20	0.97	0.06	19.05	0.64	23.07	1.41	0.02	0.00	99.65
8	187	54.10	0.19	0.80	0.03	19.09	0.66	23.85	1.56	0.00	0.01	100.27
9	201	53.77	0.25	0.92	0.01	20.54	0.84	22.80	1.56	0.05	0.01	100.76
10	78	53.02	0.20	1.21	0.00	19.29	0.63	24.00	1.64	0.00	0.00	99.99
11	79	53.01	0.32	1.25	0.00	19.44	0.69	23.71	1.58	0.00	0.00	100.00
12	102	53.92	0.25	1.14	0.00	17.28	0.70	24.80	1.92	0.00	0.00	100.01
13	123	53.04	0.25	1.17	0.00	19.73	0.63	23.35	1.82	0.00	0.00	99.99
14	124	53.03	0.22	0.85	0.00	20.32	0.77	23.21	1.60	0.00	0.00	100.00
15	125	52.68	0.32	1.52	0.00	19.93	0.49	23.41	1.66	0.00	0.00	100.01

Примечание. 1–9 – составы ортопироксена из многофазных вкрапленников, 10–15 – составы ортопироксена из многофазных вкрапленников рядом с расплавленными включениями.

Note. 1–9 – compositions of orthopyroxene from polyphase phenocrysts, 10–15 – compositions of orthopyroxene from polyphase phenocrysts near melt inclusions.

лавеси явно истощены титаном, алюминием и обладают заметно меньшей магнезиальностью по сравнению с ортопироксенами из эффузивов влк. Горелый. Эти особенности связаны с повышенными содержаниями железа в пироксенах из андезитов.

Плагииоклазы из андезитов о-ва Сулавеси образуют вкрапленники, которые в одних случаях находятся в тесном сростании с клино- и ортопи-

роксенами (“многофазные вкрапленники”) (см. рис. 2а), а в других – формируют более крупные хорошо ограненные мономинеральные кристаллы (см. рис. 2б) с многочисленными расплавленными включениями. Также плагииоклазы широко распространены в основной массе андезита в виде удлиненных микрокристалликов (см. рис. 2в, г).

Анализ составов плагииоклазов из андезитов (табл. 6) показал, что принципиальных различий

Таблица 6. Представительные анализы плагииоклазов из андезитов о-ва Сулавеси, мас. %

Table 6. Representative analyses of plagioclases from andesites of Sulawesi Island, wt %

№ 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	131	55.91	0.04	26.42	0.00	0.55	0.00	0.05	10.18	5.46	0.23	98.84
2	132	54.03	0.03	27.55	0.01	0.61	0.01	0.03	11.41	4.81	0.17	98.65
3	134	56.75	0.00	25.50	0.00	0.57	0.01	0.02	9.47	5.77	0.26	98.36
4	138	55.78	0.04	27.02	0.22	0.94	0.01	0.07	10.04	5.23	0.26	99.63
5	174	54.55	0.02	26.77	0.01	0.55	0.01	0.02	10.90	5.08	0.20	98.09
6	175	53.08	0.05	27.81	0.00	0.54	0.01	0.00	11.95	4.37	0.16	97.96
7	177	51.59	0.02	27.94	0.00	0.58	0.02	0.01	12.51	4.30	0.14	97.11
8	180	53.17	0.02	26.92	0.00	0.60	0.01	0.04	11.53	4.78	0.16	97.23
9	14	54.84	0.00	27.83	0.00	0.65	0.00	0.00	11.36	5.11	0.21	100.00
10	16	56.79	0.00	26.56	0.00	0.63	0.00	0.00	9.74	5.97	0.32	100.01
11	22	57.38	0.00	26.31	0.00	0.56	0.00	0.00	9.36	6.11	0.28	100.00
12	28	54.61	0.00	28.06	0.00	0.56	0.00	0.00	11.63	4.92	0.23	100.01
13	29	53.57	0.00	28.60	0.00	0.72	0.00	0.00	12.18	4.76	0.17	100.00
14	34	55.79	0.00	27.31	0.00	0.60	0.00	0.00	10.80	5.28	0.22	100.00
15	35	55.00	0.00	27.78	0.00	0.57	0.00	0.00	11.16	5.27	0.22	100.00
16	43	54.44	0.00	28.11	0.00	0.66	0.00	0.00	11.66	4.95	0.18	100.00
17	52	56.18	0.00	26.85	0.00	0.69	0.00	0.00	10.36	5.66	0.27	100.01
18	62	55.89	0.00	27.29	0.00	0.65	0.00	0.00	10.54	5.40	0.22	99.99
19	137	50.46	0.00	30.13	0.00	1.25	0.00	0.00	14.65	3.40	0.11	100.00
20	142	52.03	0.00	29.40	0.00	0.95	0.00	0.00	13.54	3.90	0.17	99.99
21	144	51.56	0.00	29.77	0.00	0.85	0.00	0.00	13.94	3.72	0.16	100.00
22	152	55.61	0.00	26.98	0.00	0.86	0.00	0.00	10.72	5.54	0.29	100.00
23	157	51.11	0.00	29.76	0.00	1.21	0.00	0.00	14.20	3.57	0.16	100.01
24	161	54.30	0.00	27.91	0.00	1.12	0.00	0.00	11.52	4.84	0.32	100.01
25	168	53.35	0.00	28.57	0.00	0.97	0.00	0.00	12.37	4.49	0.24	99.99
26	173	54.15	0.00	28.07	0.00	0.97	0.00	0.00	11.87	4.67	0.27	100.00
27	175	53.50	0.00	28.45	0.00	1.16	0.00	0.00	12.23	4.41	0.24	99.99
28	177	56.91	0.00	26.32	0.00	0.93	0.00	0.00	9.54	5.93	0.37	100.00
29	191	53.87	0.00	28.22	0.00	1.07	0.00	0.00	12.00	4.51	0.33	100.00
30	193	55.62	0.00	27.01	0.00	1.11	0.00	0.00	10.59	5.30	0.37	100.00

Примечание. 1–8 – составы плагииоклаза из многофазных вкрапленников, 9–18 – составы мономинеральных вкрапленников плагииоклаза рядом с расплавленными включениями, 19–30 – составы микрокристаллов плагииоклаза в основной массе.

Note. 1–8 – compositions of plagioclase from polyphase phenocrysts, 9–18 – compositions of monogene plagioclase phenocrysts near melt inclusions, 19–30 – compositions of plagioclase microcrystals in groundmass.

вкрапленников, находящихся в тесной ассоциации с пироксенами и располагающихся отдельно, не отмечено. При этом плагиоклазовые лейсты из основной массы андезита заметно отличаются от вкрапленников. По содержанию анортитового компонента плагиоклазы из многофазных (An 46–61 мол. %) и мономинеральных вкрапленников (An 45–59 мол. %) практически совпадают и соответствуют андезину и лабрадору в отличие от плагиоклазовых лейстов из основной массы (An 46–78 мол. %), имеющих более широкий состав – от андезина до битовнита. Фенокристаллы плагиоклаза из андезита о-ва Сулавеси обладают минимальными значениями ортоклазового компонента (Or 0.8–1.6 мол. %) по сравнению с данными по лейстам из основной массы (Or 0.9–3.4 мол. %).

На диаграмме K_2O –An составы плагиоклазов из многофазных и мономинеральных вкрапленников фактически перекрываются, показывая незначительные различия в значениях анортитового компонента. При этом плагиоклазовые лейсты из основной массы андезита образуют тренд с повышенными содержаниями калия и An, располагаясь в целом между вкрапленниками плагиоклаза из андезитов о-ва Сулавеси и эффузивами влк. Горелый на Камчатке (рис. 8).

РАСПЛАВНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ В МИНЕРАЛАХ АНДЕЗИТОВ о-ва СУЛАВЕСИ

В ходе термобарогеохимических исследований андезитов о-ва Сулавеси найдены и изучены расплавные включения в клино- и ортопироксенах из многофазных вкрапленников, а также в отдельных фенокристаллах плагиоклаза.

В *клинопироксене* первичные расплавные включения (размером 5–30 мкм) располагаются в основном равномерно по вкрапленнику. Формы включений в большинстве случаев показывают отчетливую негативную огранку. До высокотемпературных экспериментов включения содержат светлые фазы, среди которых преобладает стекло. Практически всегда присутствует газовый пузырек (рис. 9а).

При нагреве в микротермокамере до 900°C никаких заметных изменений во включениях в клинопироксене не происходит. При температуре около 1080°C клинопироксен темнеет. В районе 1175°C содержимое отдельных включений становится однородным. При температуре около 1220–1225°C вся пластинка с микрозернистой основной массой (содержащей исследуемый вкрапленник) начинает проплавляться с развитием светлого подвижного расплава, и мы вынуждены завершать опыт, за-

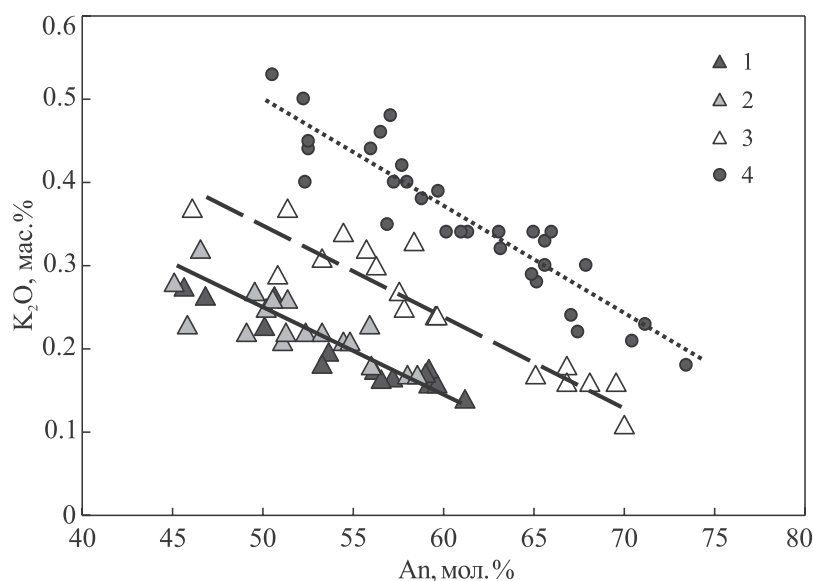


Рис. 8. Диаграмма K_2O –An для вкрапленников плагиоклаза из андезитов о-ва Сулавеси.

Рисунок построен на основе оригинальных данных с использованием материалов из работы (Симонов и др., 2021). Плагиоклазы в андезитах о-ва Сулавеси: 1 – из многофазных вкрапленников, 2 – из вкрапленников с изученными расплавными включениями, 3 – из основной массы; 4 – вкрапленники плагиоклаза в базальтовых породах влк. Горелый, Камчатка.

Fig. 8. K_2O –An diagram for plagioclase phenocrysts from andesites of the Sulawesi Island.

The figure was constructed on the basis of original data using materials from work (Simonov et al., 2021). Plagioclases in andesites of the Sulawesi Island: 1 – from multiphase phenocrysts, 2 – from phenocrysts with studied melt inclusions, 3 – from the groundmass; 4 – Plagioclase phenocrysts in basaltic rocks of the Gorely volcano, Kamchatka.

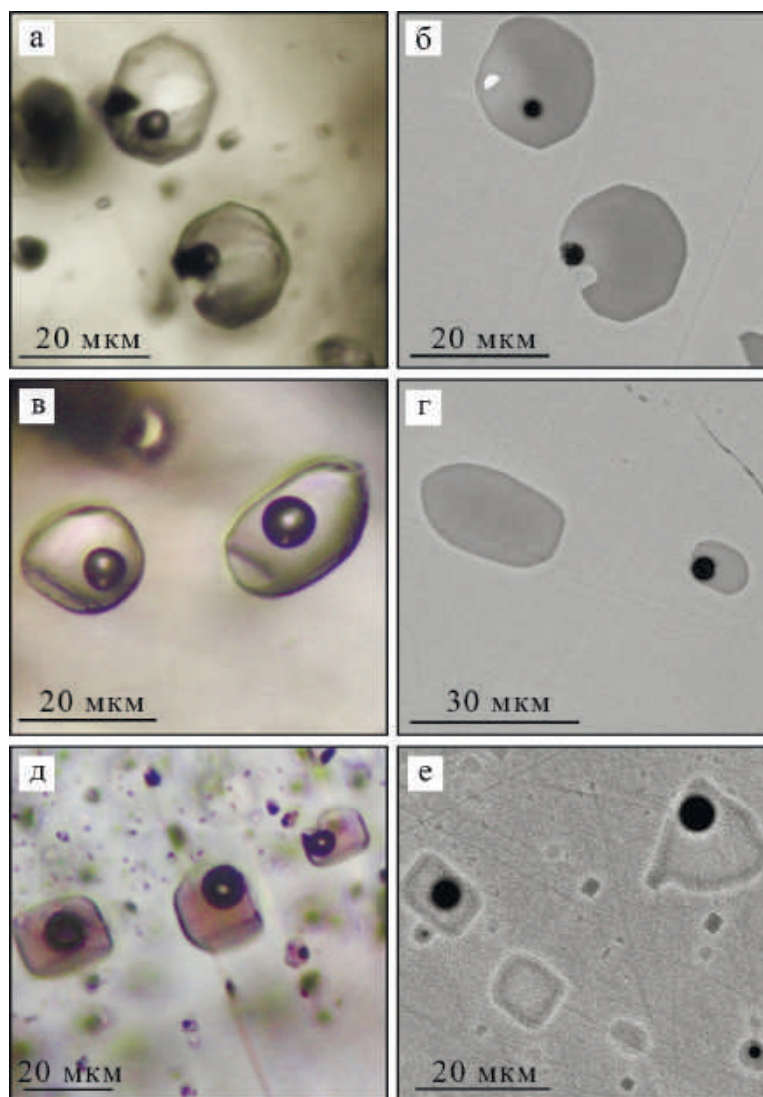


Рис 9. Расплавные включения в клинопироксене (а, б), ортопироксене (в, г), плагиоклазе (д, е).

а, в, д – негретые включения, изображения в проходящем свете; б, г, е – после высокотемпературных экспериментов и закалки, изображения в отраженных электронах.

Fig. 9. Melt inclusions: in clinopyroxene (a, б), in orthopyroxene (в, г), in plagioclase (д, е).

а, в, д – unheated inclusions, images in transmitted light; б, г, е – after high-temperature experiments and hardening, images in reflected electrons.

калиявая систему резким отключением электронагревателя. После прогрева и закалки во включениях преобладает гомогенное стекло, содержащее небольшой газовый пузырек (рис. 9б).

В ортопироксене расплавные включения близки по своим характеристикам к включениям в клинопироксене. Форма первичных включений (размером 5–40 мкм), равномерно распределенных по вкрапленнику ортопироксена, округлая, с менее выраженной, чем в случае клинопироксена, огранкой. Содержат стекло с газовым пузырьком и светлые кристаллические фазы (рис. 9в).

В ходе экспериментов ортопироксен начинает темнеть при 1085°C. При дальнейшем нагреве, так же как и в случае клинопироксена, вся матрица с вкрапленником темнеет и начинает плавиться. Для отдельных включений удалось установить температуры гомогенизации, близкие к результатам по включениям в клинопироксене, – 1170°C. Эти данные согласуются с описанием шлифов, свидетельствующим об одновременной кристаллизации клино- и ортопироксенов при формировании многофазных вкрапленников в андезите о-ва Сулавеси. После высокотемпературных экспериментов и

закалки включения в ортопироксене содержат преимущественно гомогенное стекло (рис. 9г).

В случае *плаггиоклаза* наиболее детально исследованы включения в отдельных самостоятельных вкрапленниках. Первичные расплавные включения (размером 5–25–50 мкм) равномерно заполняют центры кристаллов и располагаются прямолинейными полосами, связанными с двойниками и зонами роста. Включения обладают отчетливой границей и сложены преимущественно стеклом с газовым пузырьком (рис. 9е). Реже присутствуют многофазные (микрозернистые) темные включения.

В ходе экспериментов в микротермокамере при повышении температуры от 830 до 1000°C во включениях изменяются фазы, деформируется газовый пузырек и развивается расплав. При дальнейшем нагреве небольшие включения (5–10–15 мкм) гомогенизируются в светлый расплав при температурах 1090–1120°C. При этом все изменения во включениях в *плаггиоклазе* происходят достаточно быстро – в течение менее 10 мин.

Необходимо отметить, что температуры выше 1100°C приводят к проплавлению части крупных (более 20 мкм) включений со значительным ростом размеров газовых пузырьков, что может свидетельствовать о разгерметизации. В связи с этим при анализе химического состава основное внимание уделялось включениям размером менее 20 мкм, содержащим только гомогенное стек-

ло либо стекло с газовым пузырьком относительно меньшего размера, чем отмечено для исходного состояния включений (см. рис. 9д, е).

При рассмотрении полученных данных по составам стекол прогретых расплавных включений в *плаггиоклазе* необходимо учитывать особенности их поведения в ходе высокотемпературных экспериментов. В частности, как показали наши исследования включений в *плаггиоклазе* из игнимбрита влк. Хангар (Камчатка), при температурах выше 1100°C расплавные включения могут захватывать часть элементов из *плаггиоклаза-хозяина*. Это хорошо видно по соотношению $Al_2O_3-SiO_2$, согласно которому часть стекол прогретых выше 1100°C включений явно обогащена алюминием, источником которого послужил *плаггиоклаз-хозяин* (Симонов и др., 2022). Такой же эффект наблюдался и для отдельных включений в *плаггиоклазе* из андезита о-ва Сулавеси. Соответственно, информация по этим включениям не использовалась при рассмотрении особенностей состава магматических систем, принимавших участие при формировании андезитов о-ва Сулавеси.

В целом результаты анализов гомогенных стекол прогретых и закаленных включений во вкрапленниках пироксенов и *плаггиоклаза* (табл. 7–9) послужили основой для выяснения физико-химических условий формирования андезитов о-ва Сулавеси. При этом большое значение имеет сравни-

Таблица 7. Представительные анализы стекол прогретых и гомогенизированных расплавных включений в клинопироксене из андезитов о-ва Сулавеси, мас. %

Table 7. Representative analyses of glasses of heated and homogeneous melt inclusions in clinopyroxenes from andesites of Sulawesi Island, wt %

№ п.п.	№ анализа	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма
1	80	61.64	0.52	8.89	7.47	0.31	6.59	8.75	2.30	1.43	97.90
2	81	59.91	0.58	8.14	8.78	0.26	7.06	9.71	2.08	1.33	97.85
3	91	66.37	0.40	9.38	6.17	0.00	5.03	8.22	2.89	1.53	99.99
4	92	61.16	0.70	8.13	8.59	0.31	6.90	10.78	2.47	0.96	100.00
5	93	58.83	0.72	7.72	9.07	0.00	7.34	11.24	2.20	0.88	98.00
6	94	63.94	0.56	8.93	8.81	0.27	5.50	7.68	2.96	1.34	99.99
7	99	62.29	0.57	9.00	9.92	0.23	5.56	8.40	2.79	1.23	99.99
8	101	64.56	0.57	10.85	4.89	0.29	5.31	8.94	3.02	1.43	99.86
9	126	74.08	0.42	12.49	1.61	0.00	1.35	3.48	3.75	2.72	99.90
10	127	74.13	0.37	12.30	1.63	0.00	1.41	3.70	3.62	2.72	99.88
11	128	72.75	0.50	12.07	2.03	0.00	1.72	4.57	3.63	2.56	99.83
12	130	73.90	0.39	12.83	1.51	0.00	1.25	3.31	3.88	2.79	99.86
13	131	74.73	0.39	13.16	0.95	0.00	0.89	2.90	3.90	2.97	99.89
14	132	73.36	0.36	12.90	1.57	0.00	1.45	3.58	3.88	2.76	99.86
15	134	72.92	0.39	12.09	2.36	0.00	1.77	4.25	3.58	2.49	99.85
16	135	73.41	0.35	12.15	2.04	0.00	1.63	4.19	3.62	2.46	99.85
17	136	70.82	0.42	11.64	4.13	0.00	2.64	4.48	3.43	2.30	99.86
18	137	63.49	0.89	9.69	9.21	0.30	4.62	7.47	2.69	1.47	99.83

Таблица 8. Представительные анализы стекол прогретых и гомогенизированных расплавных включений в ортопироксене из андезитов о-ва Сулавеси, мас. %

Table 8. Representative analyses of glasses of heated and homogeneous melt inclusions in orthopyroxenes from andesites of Sulawesi Island, wt %

№ п.п.	№ анализа	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма
1	67	69.91	0.77	16.72	1.41	0.00	0.51	3.23	4.56	2.61	99.72
2	68	70.31	0.76	16.54	1.38	0.00	0.51	2.79	4.61	2.70	99.60
3	69	69.84	0.89	16.77	1.48	0.00	0.53	2.84	4.64	2.63	99.62
4	70	70.19	0.84	16.57	1.42	0.00	0.59	2.93	4.66	2.79	99.99
5	71	68.79	0.70	16.58	2.59	0.00	1.14	2.51	4.75	2.94	100.00
6	72	68.73	0.82	16.00	2.96	0.00	1.36	2.54	4.53	2.78	99.72
7	73	68.03	0.69	15.95	4.01	0.00	1.43	2.71	4.47	2.70	99.99
8	75	66.81	0.63	13.41	5.72	0.00	3.87	2.46	3.92	2.63	100.00
9	110	67.46	0.59	15.48	4.21	0.00	2.42	3.40	4.37	1.98	99.91
10	111	68.05	0.63	16.01	3.42	0.00	1.95	3.03	4.67	2.15	99.91
11	112	67.86	0.54	15.39	4.26	0.00	2.23	3.42	4.31	1.99	100.00
12	113	63.73	0.62	13.47	6.35	0.00	4.34	6.21	3.82	1.34	99.88
13	114	64.07	0.62	13.47	6.31	0.00	4.20	6.12	3.81	1.39	99.99
14	115	64.36	0.89	14.02	6.47	0.00	4.02	4.78	3.78	1.57	99.89
15	116	65.10	0.79	13.80	6.44	0.00	3.77	4.56	3.85	1.68	99.99
16	117	65.47	0.74	14.22	5.87	0.00	3.62	4.42	3.83	1.75	99.92
17	118	63.20	0.76	12.76	7.51	0.00	4.72	5.55	3.68	1.37	99.55
18	119	63.52	0.80	12.72	7.25	0.23	4.54	5.48	3.65	1.40	99.59
19	120	63.29	0.87	12.09	8.76	0.27	5.49	4.95	3.14	1.14	100.00
20	121	60.90	1.05	11.76	9.42	0.00	5.34	5.05	2.84	1.15	97.51

тельный анализ составов экспериментально полученных гомогенных стекол в прогретых включениях с данными по природно закаленным стеклам из основной массы андезита (табл. 10).

На диаграмме (Na₂O + K₂O) – SiO₂ стекла прогретых и гомогенизированных расплавных включений из рассмотренных минералов (как и составы эффузивов о-ва Сулавеси) находятся в области пород нормальной щелочности. При этом включения в пироксенах (как и породы) показывают тренд накопления щелочей на фоне роста содержания SiO₂, в корне отличающийся от характера распределения компонентов во включениях из плагиоклаза, для которых наблюдается падение содержания щелочей. Природно закаленные стекла основной массы по значительному количеству SiO₂ (77–79 мас. %) совпадают со стеклами из прогретых включений во вкрапленниках плагиоклаза, существенно отличаясь более высокими содержаниями щелочей (рис. 10). Эти факты свидетельствуют о том, что вкрапленники плагиоклаза кристаллизовались из самостоятельной магмы, а расплавы, сформировавшие основную массу андезита, были иными и выступали главным образом в качестве транспортирующего агента.

По соотношению K₂O–SiO₂ все данные по включениям и эффузивам о-ва Сулавеси (как и включения в пироксенах влк. Горелый) относятся к сериям с умеренной калиево-кислотностью. Так же, как и для суммы щелочей, можно отметить два разнонаправленных тренда: с ростом содержания калия (включения в пироксенах) и его падением (включения в плагиоклазе). При этом стекла из основной массы максимально обогащены калием – 5.2–5.5 мас. %.

На диаграмме CaO–MgO составы включений разбиваются на две группы. Включения с максимальными содержаниями кальция и магния располагаются в поле расплавных включений в пироксенах из базальтовых пород влк. Горелый. В другой группе с минимальными содержаниями элементов находятся все включения в плагиоклазе. Сравнительный анализ с информацией по распределению кальция и магния в расплавах влк. Горелый, приведенной в работе (Gavrilenko et al., 2016), показывает возможность двух магматических процессов при формировании андезитов о-ва Сулавеси. Прежде всего, это фракционирование клинопироксена (“Cpx fractionation”, рис. 11) в исходном расплаве. Кристаллизация этого минерала приводит к падению содержания кальция и магния в расплаве. Как

Таблица 9. Представительные анализы стекол прогретых и гомогенизированных расплавных включений в плагиоклазе из андезитов о-ва Сулавеси, мас. %**Table 9.** Representative analyses of glasses of heated and homogeneous melt inclusions in plagioclase from andesites of Sulawesi Island, wt %

№ п.п.	№ анализа	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма
1	1	80.59	0.49	9.88	1.79	0.00	0.17	1.41	3.07	2.60	100.00
2	6	71.60	0.27	16.47	1.15	0.00	0.00	4.60	4.04	1.87	100.00
3	13	70.08	0.29	17.41	1.18	0.00	0.00	5.02	4.54	1.47	99.99
4	10	74.02	0.34	15.45	1.00	0.00	0.00	4.11	3.49	1.61	100.02
5	20	75.41	0.25	14.30	1.26	0.00	0.00	2.56	3.76	2.45	99.99
6	23	76.43	0.67	10.73	3.28	0.00	0.46	2.20	3.40	2.68	99.85
7	24	76.03	0.73	11.77	2.62	0.00	0.34	2.26	3.37	2.76	99.88
8	26	77.24	0.74	11.15	2.29	0.00	0.39	2.04	3.33	2.72	99.90
9	31	79.77	0.80	9.39	2.52	0.00	0.30	1.76	2.86	2.52	99.92
10	37	79.60	0.75	9.37	2.73	0.00	0.36	1.62	2.84	2.61	99.88
11	38	79.76	0.72	9.43	2.67	0.00	0.44	1.54	2.67	2.66	99.89
12	39	80.02	0.73	9.39	2.70	0.00	0.37	1.53	2.65	2.60	99.99
13	40	73.13	0.81	13.19	3.03	0.00	0.50	2.60	3.84	2.78	99.88
14	46	73.96	0.55	13.41	2.32	0.00	0.38	2.63	3.81	2.84	99.90
15	47	78.98	0.59	10.60	2.12	0.00	0.25	1.81	2.98	2.69	100.02
16	48	72.55	0.40	14.37	2.20	0.00	0.35	4.02	3.65	2.36	99.90
17	55	78.61	0.57	11.19	1.93	0.00	0.00	2.28	3.14	2.28	100.00
18	56	74.16	0.45	13.48	1.89	0.00	0.19	3.62	3.77	2.34	99.90
19	57	73.26	0.38	14.54	1.95	0.00	0.24	3.84	3.55	2.24	100.00
20	59	77.39	0.53	11.89	1.95	0.00	0.17	2.59	3.11	2.36	99.99
21	60	79.54	0.57	10.32	2.20	0.00	0.24	1.97	2.63	2.44	99.91
22	61	79.99	0.61	9.99	2.04	0.00	0.26	1.82	2.90	2.40	100.01

Таблица 10. Представительные анализы природно закаленных стекол в основной массе андезитов о-ва Сулавеси, мас. %**Table 10.** Representative analyses of natural quenched glasses in groundmass from andesites of Sulawesi Island, wt %

№ п.п.	№ анализа	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Cl	Сумма
1	136	76.99	0.74	11.16	1.95	0.00	0.00	0.44	3.19	5.38	0.16	100.01
2	140	77.95	0.63	11.11	1.58	0.00	0.00	0.38	2.73	5.46	0.17	100.01
3	143	77.62	0.76	10.85	2.25	0.00	0.00	0.50	2.54	5.36	0.12	100.00
4	154	78.25	0.68	11.06	1.37	0.00	0.00	0.34	2.76	5.39	0.15	100.00
5	158	77.62	0.79	10.78	1.99	0.00	0.00	0.53	2.88	5.25	0.16	100.00
6	165	77.96	0.72	10.63	2.14	0.00	0.00	0.52	2.68	5.22	0.13	100.00
7	176	77.89	0.72	11.19	1.50	0.00	0.00	0.35	2.73	5.48	0.15	100.01
8	184	77.54	0.84	10.93	1.81	0.00	0.00	0.43	2.89	5.41	0.16	100.01
9	188	77.52	0.68	10.98	2.02	0.00	0.00	0.47	2.74	5.45	0.15	100.01
10	190	78.62	0.76	10.78	1.67	0.00	0.00	0.41	2.32	5.30	0.14	100.00

показано для влк. Горелый (Gavrilenko et al., 2016), значительную роль могут играть процессы смешения (“mixing”) базальтовых и дацитовых магматических систем. Распределение данных по расплав-

ным включениям на рис. 11 показывают возможность развития этих двух процессов и при формировании андезитов о-ва Сулавеси. При этом включения в клинопироксене фиксируют составы ис-

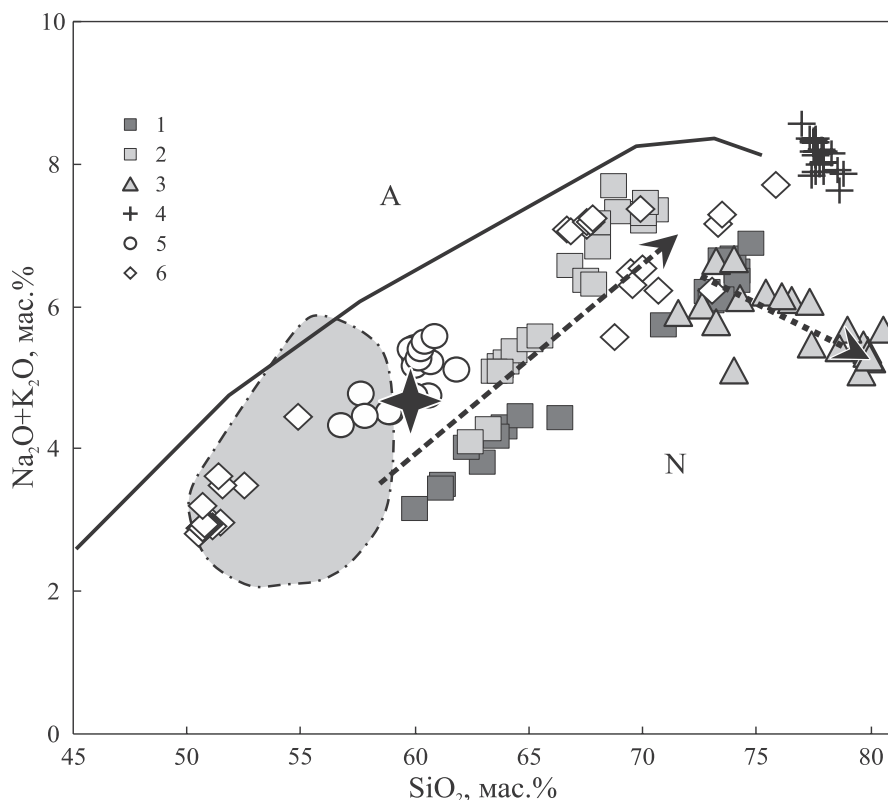


Рис. 10. Диаграмма $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})-\text{SiO}_2$ для стекол прогретых и гомогенизированных расплавных включений.

Рисунок построен на основе оригинальных данных с использованием материалов из работ (Петрографический кодекс России, 2009; Симонов и др., 2021; Kushendratno et al., 2012). Включения в: 1 – клинопироксене, 2 – ортопироксене, 3 – плагиоклазе из андезитов о-ва Сулавеси; 4 – стекло из основной массы андезита; 5 – андезиты о-ва Сулавеси; 6 – эффузивные породы северо-востока о-ва Сулавеси. Тренды включений в пироксенах (штрихпунктирная линия) и плагиоклазе (пунктирная линия). Области пород: А – щелочных, N – нормальных. Серое поле – данные по включениям преимущественно в клинопироксене из базальтовых пород влк. Горелый, Камчатка. Звезда – состав детально изученного образца андезита. Составы пород и включений приведены к 100%.

Fig. 10. Diagram $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})-\text{SiO}_2$ for glasses of heated and homogenized melt inclusions.

The figure was constructed on the basis of original data using materials from works (Petrographic Code of Russia..., 2009; Simonov et al., 2021; Kushendratno et al., 2012). Inclusions in: 1 – clinopyroxene, 2 – orthopyroxene, 3 – plagioclase from andesites of the Sulawesi Island; 4 – glass from the groundmass of andesite, 5 – andesites of the Sulawesi Island; 6 – effusive rocks of the north-east of the Sulawesi Island. Inclusion trends in pyroxenes (dashed-dot line) and plagioclase (dashed line). Areas of rocks: A – alkaline, N – normal. Gray field shows data on inclusions predominantly in clinopyroxene from basaltic rocks of the Gorely volcano, Kamchatka. The star is the composition of a detailed studied andesite sample. Rock and inclusion compositions are recalculated by 100%.

ходных магм. Данные по включениям в орто- и клинопироксенах отражают эволюцию расплавов (с падением содержания CaO и MgO), связанную с фракционированием пироксенов и смешением с кислой магмой, при участии которой кристаллизовались вкрапленники плагиоклаза.

Основные закономерности эволюции составов расплавных включений в минералах андезитов о-ва Сулавеси хорошо видны на вариационных диаграммах, представляющих информацию о распределении большинства петрохимических компонентов. Тренды расплавных включений в пироксенах, начинаясь от поля включений в пироксенах из базальтовых пород влк. Горелый, отмечают падение со-

держания титана, железа, магния, кальция и накопление алюминия и натрия на фоне роста SiO_2 . Составы расплавных включений в плагиоклазе показывают противоположную тенденцию по сравнению с включениями в пироксенах: увеличение содержания титана и железа при одновременном падении содержания алюминия и натрия на фоне роста содержания SiO_2 . Таким образом, установленное на примере щелочей в составе включений (см. рис. 10) участие при формировании андезитов о-ва Сулавеси двух типов расплавов подтверждается привлечением и других химических компонентов.

Исследования летучих компонентов с помощью КР-спектроскопии и РСМА согласно методике

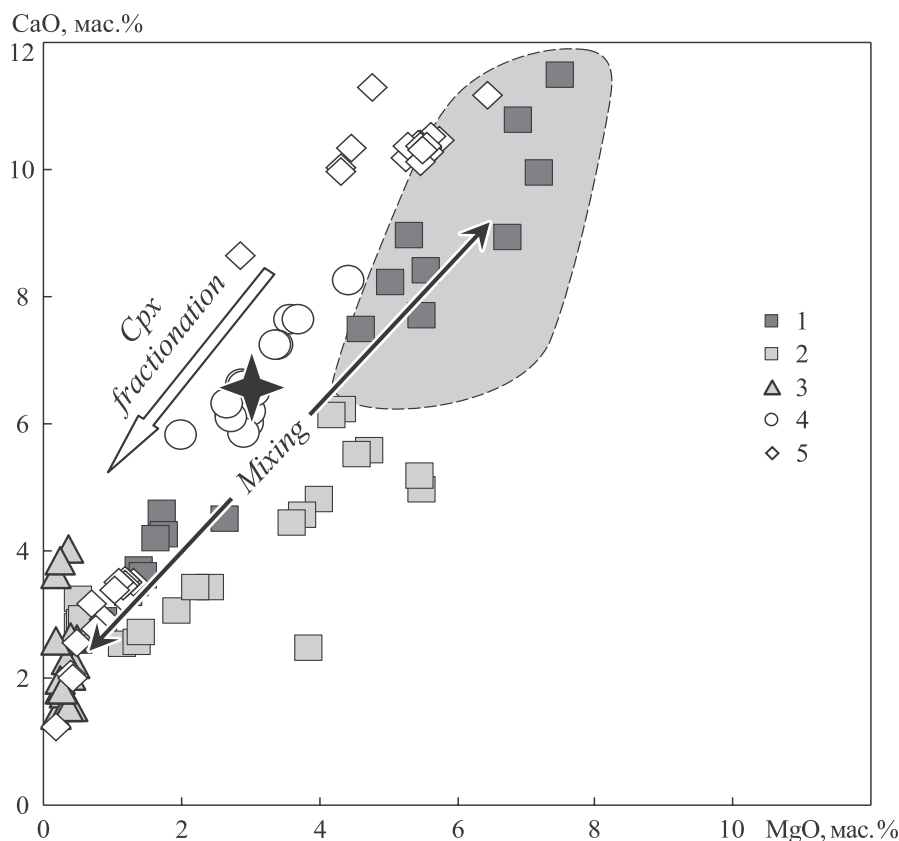


Рис. 11. Диаграмма CaO–MgO для стекол прогретых и гомогенизированных расплавных включений.

Рисунок построен на основе оригинальных данных с использованием материалов из работ (Симонов и др., 2021; Kushen-dratno et al., 2012; Gavrilenko et al., 2016). Включения в: 1 – клинопироксене, 2 – ортопироксене, 3 – плагиоклазе из андезитов о-ва Сулавеси; 4 – андезитах о-ва Сулавеси; 5 – эффузивных породах северо-востока о-ва Сулавеси. Серое поле – данные по включениям преимущественно в клинопироксене из базальтовых пород влк. Горелый, Камчатка. Звезда – состав детально изученного образца андезита. “Cpx fractionation” – фракционирование клинопироксена. “Mixing” – смешение расплавов. Составы пород и включений приведены к 100%.

Fig. 11. CaO–MgO diagram for glasses of heated and homogenized melt inclusions.

The figure was constructed on the basis of original data using materials from works (Simonov et al., 2021; Kushen-dratno et al., 2012; Gavrilenko et al., 2016).

Inclusions in: 1 – clinopyroxene, 2 – orthopyroxene, 3 – plagioclase from andesites of the Sulawesi Island; 4 – andesites of the Sulawesi Island; 5 – effusive rocks of the northeast of the Sulawesi Island. Gray field shows data on inclusions predominantly in clinopyroxene from basaltic rocks of the Gorely volcano, Kamchatka. The star is the composition of a detailed studied andesite sample. “Cpx fractionation” – fractionation of clinopyroxene. “Mixing” – mixing of melts. Rock and inclusion compositions are recalculated by 100%.

(Котов и др., 2021) позволили установить содержание воды в гомогенных стеклах прогретых включений во вкрапленниках плагиоклаза – от 1.95 до 4.62 мас. %. При этом намечается определенная корреляция содержаний кремнезема и воды в стеклах включений в плагиоклазе: с ростом содержания SiO_2 (ненормированные данные – 71 мас. % → 75 мас. % → 79–80 мас. %) падает соответственно количество H_2O : 4.62 → 3.67–2.59 → 1.95 мас. %.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты комплексных исследований андезитов северо-востока о-ва Сулавеси с помощью пе-

тролого-геохимических, минералогических и термобарогеохимических методов свидетельствуют о сложной истории формирования и развития магматизма островной дуги Сулавеси.

В частности, петрографические данные о структуре андезитов указывают на наличие нескольких этапов формирования этих пород. Первый этап отразился в кристаллизации многофазных ($\text{Cpx} + \text{Opx} + \text{Pl}$) вкрапленников. При этом, как показано в результате анализа расплавных включений, активную роль играли андезитовые магмы. В дальнейшем идет проникновение расплава с высоким содержанием SiO_2 , несущего крупные вкрапленники плагиоклаза (с расплавными включени-

ями риолитового состава). Таким образом, происходит резкая смена андезитовых магматических систем на кислые расплавы, имеющие свои особенности эволюции и послужившие источником кристаллизации мономинеральных вкрапленников плагиоклаза.

Петрохимические и геохимические исследования показывают сходство составов андезитов о-ва Сулавеси, с одной стороны, с эффузивами развитых островных дуг, а с другой – с бонинитами из примитивных островодужных систем, что свидетельствует о действии различных надсубдукционных магм. Анализ составов вкрапленников клинопироксена подтверждает результаты исследования составов андезитов, показывая развитие переходных расплавов от толеитов к известково-щелочным. При этом часть рассмотренных пироксенов соответствует клинопироксенам из бонинитов, что свидетельствует о возможном участии магматизма примитивных о-вных дуг при формировании андезитов о-ва Сулавеси.

Данные по расплавленным включениям в минералах-вкрапленниках демонстрируют возможность развития двух магматических процессов (фракционирование пироксена и смешение с кислым расплавом) при формировании андезитов о-ва Сулавеси, подобных установленным ранее для влк. Горелый (Gavrilenko et al., 2016). Информация по включениям в орто- и клинопироксенах отражает эволюцию расплавов (с падением Ca и Mg), связанную с фракционированием пироксенов, а данные по включениям в плагиоклазе (с падением Al и Na) указывают на смешение с кислой магмой. Наличие кислых включений в плагиоклазе свидетельствует о смешении магматических систем при формировании эффузивов и других современных островных дуг (Низаметдинов и др., 2017; Низаметдинов, 2022).

В целом исследования экспериментально полученных стекол в прогретых включениях из вкрапленников, а также анализ природно закаленных стекол основной массы показали, что формирование андезитов о-ва Сулавеси происходило при участии трех самостоятельных магматических систем. Включения во вкрапленниках пироксенов демонстрируют закономерную эволюцию магматизма с накоплением щелочей и кремнезема (как и составы эффузивов северо-востока о-ва Сулавеси) от андезитов до риолитов. Включения в плагиоклазовых вкрапленниках свидетельствуют о развитии максимально кислых магм, эволюционирующих с понижением роли щелочей. Стекла в основной массе андезитов свидетельствуют об участии кислых магм с максимальным содержанием щелочей в транспортировке ранее образованных вкрапленников.

Для определения условий кристаллизации вкрапленников клинопироксена и ортопироксена

из андезита о-ва Сулавеси использована программа WinPLtb, основанная на соотношениях составов пироксена и расплава, из которого он кристаллизуется (Clinopyroxene-Liquid Thermobarometry) (Yavuz, Yildirim, 2018). Состав расплава определен на основе анализа гомогенных стекол прогретых включений. Содержание воды в расплаве оценено в результате сравнения данных по расплавленным включениям в пироксенах и плагиоклазах. Исследование состава стекол включений в этих минералах показало их сходство в диапазонах содержаний SiO_2 70–75 мас. % (см. рис. 10). При этом установлено содержание воды в стеклах включений (минимум 2.6 мас. % при содержании SiO_2 70–75 мас. %) во вкрапленниках плагиоклаза. Именно эти данные по количеству H_2O нами вполне обоснованно использовались при расчетах условий кристаллизации пироксенов.

Глубины кристаллизации пироксенов определены на основе параметров давлений, установленных с помощью программы (Yavuz, Yildirim, 2018). При этом использовались характеристики для андезитов, плотность которых, согласно справочным данным, в среднем составляет около 2.6 г/см³. Уровни образования клинопироксенов дополнительно оценены напрямую по программе (Yavuz, Yildirim, 2018) с использованием плотностно-глубинных моделей для островодужного магматизма (DeBari, Greene, 2011).

Установлены широкие интервалы глубин (27.6–7.2 км) и температур (1150–970°C) кристаллизации пироксенов. Выяснено, что ортопироксен начал кристаллизоваться на более глубоких уровнях (27.6–21.2 км), чем клинопироксен (23.4–14.6 км). В то же время температуры кристаллизации ортопироксена (1130–1090°C) ниже, чем клинопироксена (1150–1105°C). В целом расчетные температуры заметно меньше экспериментальных температур гомогенизации включений (1175–1170°C). В ходе подъема магмы кристаллизация пироксенов продолжалась и на более высоких уровнях: ортопироксен – 13.3–7.2 км (1040–1005°C), клинопироксен – 11.3–8.2 км (1105–1085°C). При этом образование клинопироксена могло происходить в промежуточных очагах при фактически постоянных давлениях в ходе значительного снижения температур до 970°C (рис. 12). Наличие двух подобных глубинных уровней формирования фенокристаллов установлено нами ранее для влк. Горелый, Камчатка (Симонов и др., 2021).

На основе данных по составам плагиоклазов и находящихся в них расплавленных включений по программе (Putirka, 2008) рассчитаны температуры кристаллизации вкрапленников плагиоклаза с использованием оригинальных данных по содержанию воды в стеклах прогретых включений. В результате выяснено, что кристаллизация плагиоклазовых вкрапленников в андезитах о-ва Сулавеси

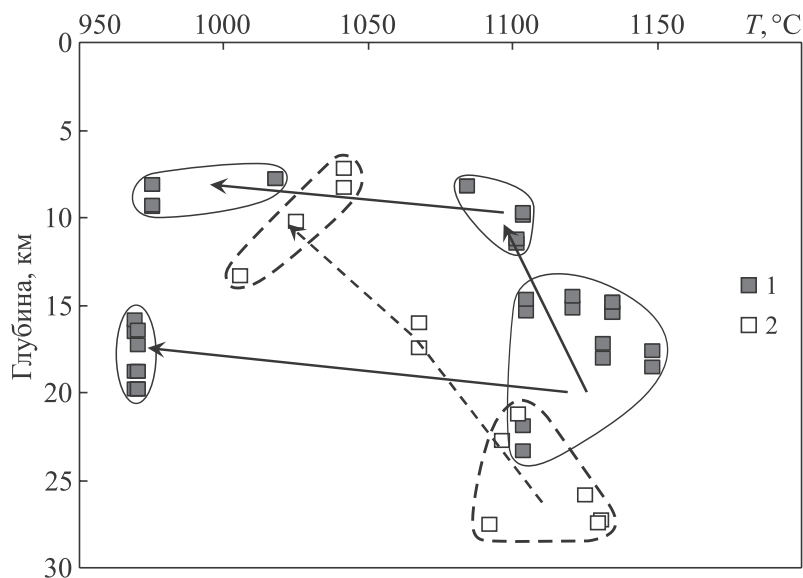


Рис. 12. Условия кристаллизации минералов из андезитов о-ва Сулавеси в промежуточных магматических очагах.

1 – данные по вкрапленникам клинопироксена и находящимся в них расплавленным включениям, 2 – данные по вкрапленникам ортопироксена и находящимся в них расплавленным включениям.

Fig. 12. Conditions of crystallization of minerals from andesites of the Sulawesi Island in intermediate magma chambers.

1 – data on phenocrysts of clinopyroxene and melt inclusions in them, 2 – data on orthopyroxene phenocrysts and melt inclusions in them.

си происходила в интервалах температур 930–910 и 900–890°C. Они заметно ниже температур гомогенизации включений 1090–1120°C. С учетом того, что в ходе экспериментов прогрев выше 1100°C может приводить к проплавлению и разгерметизации части включений с ростом размеров газовых пузырьков, установленные температуры гомогенизации могут быть завышенными и, соответственно, наиболее близки к реальной ситуации расчетные данные.

С помощью программы (Putirka, 2008) рассчитаны также температуры кристаллизации микролейт плаггиоклаза в основной массе из андезитов о-ва Сулавеси. Основой расчетов послужили оригинальные данные по составам микрокристаллов плаггиоклаза и находящегося между ними природного стекла. Содержание воды оценивалось с учетом полученной нами информацией по стеклам прогретых расплавленных включений во вкрапленниках плаггиоклаза, непосредственно контактирующих со стеклом основной массы андезита. Соответственно, для стекол основной массы с SiO₂ около 73 мас. % содержание воды принималось равным 4.6 мас. %, а для стекол с содержанием SiO₂ около 75 мас. % – равным 3.1 мас. %. В результате установлено три температурных интервала кристаллизации кристалликов плаггиоклаза в основной массе андезитов о-ва Сулавеси: 875–865, 840–825 и 820–810°C.

ОСНОВНЫЕ ВЫВООДЫ

1. Результаты петрохимических, геохимических и минералогических исследований свидетельствуют о сложных процессах формирования андезитов о-ва Сулавеси при участии островодужных расплавов, переходных от толеитов к известково-щелочным, показывая при этом определенное сходство андезитов с бонинитами, что указывает на возможное участие магматизма примитивных островных дуг.

2. Петрографические данные о структуре андезитов о-ва Сулавеси свидетельствуют о том, что в начале кристаллизовались многофазные ($Cpx+Opx+Pl$) вкрапленники. В дальнейшем происходила смена магматических систем на кислые расплавы, имеющие свои особенности эволюции и послужившие источником кристаллизации мономинеральных вкрапленников плаггиоклаза.

3. Данные по расплавленным включениям в минералах-вкрапленниках показывают возможность развития двух магматических процессов (фракционирование клинопироксена и смешение с кислым расплавом) при формировании андезитов о-ва Сулавеси. При этом информация по включениям в пироксенах отражает эволюцию расплавов (с падением содержания Ca и Mg), связанную с фракционированием клинопироксена, а данные по включениям в плаггиоклазе (с падением Al и Na) указывают на смешение с кислой магмой.

4. В результате исследования стекол во включениях и в основной массе установлено, что формирование андезитов о-ва Сулавеси происходило при участии трех самостоятельных магматических систем. Включения в пироксенах показывают закономерную эволюцию магматизма с накоплением щелочей и кремнезема от андезитов до риолитов. Включения в плагиоклазе свидетельствуют о развитии кислых магм, эволюционирующих с уменьшением роли щелочей. Стекла в основной массе указывают на участие кислых магм с максимальным содержанием щелочей преимущественно в транспортировке ранее образованных вкрапленников.

5. Совместное использование данных по составам минералов и стекол в расплавных включениях и основной массе позволили установить *PT*-параметры формирования андезитов о-ва Сулавеси. Выяснено, что пироксены кристаллизовались в двух промежуточных магматических очагах (на глубинах 27.6–14.6 и 11.3–7.2 км) при температурах от 1150 до 970°C. Образование вкрапленников плагиоклаза происходило в интервалах 930–910 и 900–890°C, а кристаллизация микрокристаллов плагиоклаза в основной массе – при температурах 875–865, 840–825 и 820–810°C. В общем кристаллизация минералов в андезитах осуществлялась с задержками при постоянных давлениях в промежуточных очагах и существенном падении температуры, что способствовало процессам фракционирования и смешения расплавов.

Благодарности

Авторы выражают благодарность С.К. Кривоногову за помощь при проведении полевых работ в Индонезии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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. <http://dx.doi.org/10.15372/GiG20160701>
- Добрецов Н.Л., Симонов В.А., Котляров А.В., Карманов Н.С. (2019) Физико-химические параметры магматизма вулканов Уксичан и Ичинский (Срединный хребет Камчатки): данные по расплавным включениям. *Геология и геофизика*, **60**(10), 1353–1383. <https://doi.org/10.15372/GiG20191000>
- Добрецов Н.Л., Симонов В.А., Кулаков И.Ю., Котляров А.В. (2017) Проблемы фильтрации флюидов и расплавов в зонах субдукции и общие вопросы теплофизического моделирования в геологии. *Геология и геофизика*, **58**(5), 701–722. <https://doi.org/10.15372/GiG20170503>
- Королук 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. <https://doi.org/10.31857/S086959032104004X>
- Кузьмин М.И. (1985) Геохимия магматических пород фанерозойских подвижных поясов. Новосибирск: Наука, 198 с.
- Куренков С.А., Диденко А.Н., Симонов В.А. (2002) Геодинамика палеоспреди́нга. М.: ГЕОС, 249 с.
- Лаврентьев Ю.Г., Королук В.Н., Усова Л.В., Нигматулина Е.Н. (2015) Рентгеноспектральный микроанализ породообразующих минералов на микроанализаторе JXA-8100. *Геология и геофизика*, **56**(10), 1813–1824. <http://dx.doi.org/10.15372/GiG20151005>
- Низаметдинов И.Р. (2022) Петрогенезис посткальдерных вулканитов кальдеры Медвежья на примере вулкана Меньший Брат, о. Итуруп. Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Новосибирск: ИГМ СО РАН, 23 с.
- Низаметдинов И.Р., Кузьмин Д.В., Смирнов С.З., Тимина Т.Ю., Шевко А.Я., Гора М.П. (2017) Происхождение магнезиальных базальтов вулкана Меньший Брат (кальдера Медвежья, о. Итуруп). *Петрология магматических и метаморфических комплексов*. Мат-лы IX Всерос. конф. с междунар. участием. Томск: Томский центр науч.-техн. информации, 333–338.
- Низаметдинов И.Р., Кузьмин Д.В., Смирнов С.З., Рыбин А.В., Кулаков И.Ю. (2019) Вода в родоначальных базальтовых магмах вулкана Меньший Брат (о. Итуруп, Курильские о-ва). *Докл. АН*, **468**(1), 93–97. <https://doi.org/10.31857/S0869-5652486193-97>
- Петрографический кодекс России. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования. (2009) Изд-е третье, испр. и доп. СПб.: Изд-во 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. <https://doi.org/10.15372/GiG2020164>
- 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*. Мат-лы Первой Всерос. науч. конф., посвящ. памяти академика РАН Н.Л. Добрецова. Новосибирск: СО РАН, 292–295. <https://doi.org/10.53954/9785604782484>
- Соболев А.В., Слуцкий А.Б. (1984) Состав и условия кристаллизации исходного расплава сибирских меймечитов в связи с общей проблемой ультраосновных магм. *Геология геофизика*, **12**, 97–110.

REFERENCES

- Arculus R.J., Pearce J.A., Murton B.J., Van der Laan S.R. (1992) Igneous stratigraphy and major-element geochemistry of holes 786a and 786b. *Proc. Ocean Drill. Progr.: Sci. Results*, **125**, 143-169.
- Boynton W.V. (1984) Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. *Rare earth element geochemistry*. (Ed. P. Henderson). Oxford-Amsterdam: Elsevier, 63-114.
- Condie K.C. (2005) Earth as an Evolving Planetary System. L.: Elsevier Acad. Press, 447 p.
- DeBari S.M., Greene A.R. (2011) Vertical stratification of composition, density, and inferred magmatic processes in exposed arc crustal sections. *Arc-continent collision. Frontiers in Earth Sciences*. Berlin: Springer-Verlag, 121-144. https://doi.org/10.1007/978-3-540-88558-0_5
- Gavrilenko M., Ozerov A., Kyle P.R., Carr M.J., Nikulin A., Vidito C., Danyushevsky L. (2016) Abrupt transition from fractional crystallization to magma mixing at Gorely volcano (Kamchatka) after caldera collaps. *Bull. Volcanol.*, **78**(7), 1-28.
- Global Volcanism Program. Database Volcanoes of the World v. 5.0.0. (Ed. E. Venzke). (2022) 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. *J. Asian Earth Sci.*, **20**, 353-431. [https://doi.org/10.1016/S1367-9120\(01\)00069-4](https://doi.org/10.1016/S1367-9120(01)00069-4)
- Kunrat S.L. (2017) Soputan volcano, Indonesia: petrological systematics of volatiles and magmas and their bearing on explosive eruptions of a basalt volcano. Ph.D. thesis. 119 p.
- 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. *Bull. Volcanol.*, **74**(7), 1581-1609. <https://doi.org/10.1007/s00445-012-0620-2>
- Murton B.J., Peate D.W., Arculus R.J., Pearce J.A., Van der Laan S.R. (1992) Trace-element geochemistry of volcanic rocks from site 786: the Izu-Bonin forearc. *Proc. Ocean Drilling Progr.: Sci. Results*, **125**, 211-235.
- Putirka K.D. (2008) Thermometers and barometers for volcanic systems. *Rev. Mineral. Geochem.*, **69**(1), 61-120. <https://doi.org/10.2138/rmg.2008.69.3>
- 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. *J. Petrol.*, **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. *J. Asian Earth Sci.*, **138**, 72-91. [dx.doi.org/10.1016/j.jseaes.2017.02.005](https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2017.02.005)
- Yavuz F., Yildırım D.K. (2018) A Windows program for pyroxene-liquid thermobarometry. *Periodico di Mineralogia*, **87**(2), 149-172. <http://dx.doi.org/10.2451/2018PM787>
- 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 <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2022.106742>
- Arculus R.J., Pearce J.A., Murton B.J., Van der Laan S.R. (1992) Igneous stratigraphy and major-element geochemistry of holes 786a and 786b. *Proc. Ocean Drill. Progr.: Sci. Results*, **125**, 143-169.
- Boynton W.V. (1984) Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. *Rare earth element geochemistry*. (Ed. P. Henderson). Oxford-Amsterdam, Elsevier, 63-114.
- Condie K.C. (2005) Earth as an Evolving Planetary System. London, Elsevier Acad. Press, 447 p.
- DeBari S.M., Greene A.R. (2011) Vertical stratification of composition, density, and inferred magmatic processes in exposed arc crustal sections. *Arc-continent collision. Frontiers in Earth Sciences*. Berlin, Springer-Verlag, 121-144. https://doi.org/10.1007/978-3-540-88558-0_5
- Dobretsov N.L., Simonov V.A., Kotlyarov A.V., Karmanov N.S. (2019) Physicochemical parameters of magmatism of the Uksichan and Ichinsky volcanoes (Sredinnyi Ridge, Kamchatka): Data on melt inclusions. *Russ. Geol. Geophys.*, **60**(10), 1077-1100. <https://doi.org/10.15372/RGG2019100>
- 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). *Russ. Geol. Geophys.*, **57**(7), 993-1015. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.06.001>
- Dobretsov N.L., Simonov V.A., Kulakov I.Yu., Kotlyarov A.V. (2017) Migration of fluids and melts in subduction zones and general aspects of thermophysical modeling in geology. *Russ. Geol. Geophys.*, **58**(5), 571-585. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.09.028>
- Gavrilenko M., Ozerov A., Kyle P.R., Carr M.J., Nikulin A., Vidito C., Danyushevsky L. (2016) Abrupt transition from fractional crystallization to magma mixing at Gorely volcano (Kamchatka) after caldera collaps. *Bull. Volcanol.*, **78**(7), 1-28.
- Global Volcanism Program. Database Volcanoes of the World v. 5.0.0. (Ed. E. Venzke). (2022) 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. *J. Asian Earth Sci.*, **20**, 353-431. [https://doi.org/10.1016/S1367-9120\(01\)00069-4](https://doi.org/10.1016/S1367-9120(01)00069-4)
- Korolyuk V.N., Lavrent'ev Yu.G., Usova L.V., Nigmatulina E.N. (2008) JXA-8100 microanalyzer: accuracy of analysis of rock-forming minerals. *Russ. Geol. Geophys.*, **49**(3), 165-168. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2007.07.005>
- Kotov A.A., Smirnov S.Z., Plechov P.Y., Persikov E.S., Chertkova N.V., Maksimovich I.A., Karmanov N.S., Bukhtiyarov P.G. (2021) Method for Determining Water Content in Natural Rhyolitic Melts by Raman Spectroscopy and Electron Microprobe Analysis. *Petrology*, **29**, 386-403 <https://doi.org/10.1134/S0869591121040044>
- Kunrat S.L. (2017) Soputan volcano, Indonesia: petrological systematics of volatiles and magmas and their bearing on explosive eruptions of a basalt volcano. Ph.D. thesis. 119 p.
- 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. *Bull. Volcanol.*, **74**(7), 1581-1609. <https://doi.org/10.1007/s00445-012-0620-2>

- ards at Soputan volcano – a basalt stratovolcano in north Sulawesi, Indonesia. *Bull. Volcanol.*, **74**(7), 1581-1609.
- Kuz'min M.I. (1985) Geochemistry of igneous rocks of the Phanerozoic mobile belts. Novosibirsk, Nauka Publ., 198 p. (In Russ.)
- Kurenkov S.A., Didenko A.N., Simonov V.A. (2002) Geodynamics of paleospreading. Moscow, GEOS Publ., 249 p. (In Russ.)
- Murton B.J., Peate D.W., Arculus R.J., Pearce J.A., Van der Laan S.R. (1992) Trace-element geochemistry of volcanic rocks from site 786: the Izu-Bonin forearc. *Proc. Ocean Drilling Program: Sci. Results*, **125**, 211-235.
- Lavrent'ev Yu.G., Usova L.V. (2018) The sum of component concentrations as a quality indicator in X-ray electron probe microanalysis of minerals. *Russ. Geol. Geophys.*, **59**(11), 1461-1468. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2018.10.006>
- Nizametdinov I.R. (2022) Petrogenesis of post-caldera volcanic rocks of the Medvezhya caldera on Menshiy Brat volcano, Iturup island. PhD thesis abstract. Novosibirsk, IGM SO RAN, 23 p.
- Nizametdinov I.R., Kuz'min D.V., Smirnov S.Z., Rybin A.V., Kulakov I.Y. (2019) Water in parental basaltic magmas of Menshiy Brat volcano (Iturup island, Kurile islands). *Doklady Earth Sci.*, **486**(1), 525-528. <https://doi.org/10.31857/S0869-5652486193-97>
- Nizametdinov I.R., Kuzmin D.V., Smirnov S.Z., Timina T.Y., Shevko A.Y., Gora M.P. (2017) The origin of high-magnesium Menshiy Brat volcano basalts (Medvezhya caldera, Iturup island). *Petrology of magmatic complexes*. Proceedings of the IX All-Russian Conference with International Participation. **9**. Tomsk, Tomsk Center for Scientific and Technical Information, 333-338.
- Petrographic Code of Russia. Magmatic, metamorphic, metasomatic, impact formations. (2009) Third ed., rev. and add. St.Petersburg, VSEGEI Publishing House, 200 p.
- Putirka K.D. (2008) Thermometers and barometers for volcanic systems. *Rev. Mineral. Geochem.*, **69**(1), 61-120. <https://doi.org/10.2138/rmg.2008.69.3>
- Simonov V.A. (1993) Petrogenesis of ophiolites (thermobarogeochemical studies). Novosibirsk, SO RAN OIGGM, 247 p. (In Russ.)
- 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. *Russ. Geol. Geophys.*, **62**(1), 83-108. <https://doi.org/10.2113/RGG20194100>
- Simonov V.A., Kotlyarov A.V., Smirnov S.Z., Kotov A.A., Perepelov A.B., Karmanov N.S., Borovikov A.A. (2022) Conditions of ignimbrites formation on the Khangar volcano (Kamchatka): data on glasses and inclusions. *Dobretsov Readings: First-hand science*. Proceedings of the first All-Russian scientific conference dedicated to the memory of Academician of the Russian Academy of Sciences N.L. Dobretsov. Novosibirsk, SO RAN, 292-295. (In Russ.) <https://doi.org/10.53954/9785604782484>
- 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. *J. Petrol.*, **35**, 1183-1211.
- Sobolev A.V., Slutskiy A.B. (1984) Composition and crystallization conditions of the Siberian meimechites initial melt in relation with general problem of ultrabasic magmas. *Geol. Geophys.*, (12), 97-110. (In Russ.)
- 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. *J. Asian Earth Sci.*, **138**, 72-91. [dx.doi.org/10.1016/j.jseae.2017.02.005](https://doi.org/10.1016/j.jseae.2017.02.005)
- Yavuz F., Yıldırım D.K. (2018) A Windows program for pyroxene-liquid thermobarometry. *Periodico di Mineralogia*, **87**(2), 149-172. <http://dx.doi.org/10.2451/2018PM787>
- 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 <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2022.106742>