

Условия формирования андезитов острова Сулавеси (Индонезия)

Н. В. Дмитриева¹, И. Ю. Сафонова^{1,2,3,4}, В. А. Симонов¹, А. В. Котляров¹, Н. С. Карманов¹, И. Р. Низаметдинов¹

¹Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3
E-mail: kotlyarov@igm.nsc.ru

²Новосибирский национальный исследовательский государственный университет
630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

³Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН
620110, Екатеринбург, ул. Академика Вонсовского, 15

⁴Юго-западный университет Джаотонг, Чэнду, Китай

Поступила в редакцию

Аннотация

Объект исследования. Андезитовые комплексы кальдеры Тондоно и вулканической постройки Локон-Эмпунг в северо-восточной части острова Сулавеси (Индонезия).

Цель. Определение условий формирования андезитов северо-востока острова Сулавеси (Индонезия) на основе детальных исследований эффузивов кальдеры Тондоно и вулкана Локон-Эмпунг.

Материалы и методы. Исследовалась коллекция эффузивных пород, собранная Сафоновой И.Ю. в северо-восточной части острова 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 (Putirka, 2008; Yavuz, Yıldırım, 2018).

Результаты. Андезиты острова Сулавеси формировались при участии толеитовых и известково-щелочных островодужных магм. Пироксены кристаллизовались из расплавов, эволюционирующих с накоплением щелочей и кремнезема. Для кислых магм, из которых образовались плагиоклазы, характерно понижение роли щелочей. Стекла в основной массе показывают участие кислых расплавов с максимальным содержанием щелочей. На основе данных по составам минералов и стекол (во включениях и в основной массе) определены *PT* – параметры формирования андезитов. Выяснено, что пироксены кристаллизовались в двух промежуточных магматических очагах (на глубинах 27,6-14,6 км и 11,3-7,2 км) при температурах от 1150°C до 970°C. Образование вкрапленников плагиоклаза происходило в интервалах 930-910°C и 900-890°C. Кристаллизация микрокристаллов плагиоклаза в основной массе шла при более низких температурах: 875-865°C, 840-810°C.

Выводы. Формирование андезитов острова Сулавеси происходило при участии островодужных расплавов, переходных от толеитов к известково-щелочным и показывающих некоторое сходство с бонинитами, что говорит о возможном влиянии магматизма внутриокеанических островных дуг. Среди андезит-образующих магм выделяются (согласно результатам анализа стекол во включениях и в 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 температуре 1150°C-970°C. Плагиоклаз образовался при более низких температурах 930-810°C.

Ключевые слова: андезиты, вкрапленники клинопироксена, ортопироксена и плагиоклаза, расплавные включения, условия формирования, остров Сулавеси, Индонезия.

Formation conditions of andesites of Sulawesi Island (Indonesia)

Nadezhda V. Dmitrieva¹, Inna Yu. Safonova^{1,2,3,4}, Vladimir A. Simonov¹, Alexey V. Kotlyarov¹, Nikolai S. Karmanov¹, Il'dar R. Nizametdinov¹

¹V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of RAS, Novosibirsk, Russia

²Novosibirsk National Research State University, Novosibirsk, Russia

³The Federal State Institution of Science the Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia

⁴Southwest Jiaotong University, Chengdu, China

Abstract

Research subject. Andesitic complexes of the Tondono caldera and of the Lokon-Empung volcanic structure in the northeastern part of the Sulawesi Island (Indonesia).

Aim. Determination of conditions for the formation of andesites in the northeast of the Sulawesi Island (Indonesia) based on detailed studies of effusive rocks from the Tondono caldera and Lokon-Empung volcano.

Materials and methods. The collection of effusive rocks, gathered by Safonova I.Yu. in the northeastern part of the Sulawesi Island (Indonesia) was studied. Along with the traditional (petrochemical, geochemical and mineralogical) methods to determine the conditions for the formation of andesites, much attention was paid to the study of melt inclusions, the compositions of which were analysed on a MIRA 3 LMU scanning microscope with microanalysis system Aztec Energy XMax 80, as well as using Raman spectroscopy on a Horiba LabRam HR800 instrument. *PT* - crystallization parameters of phenocrysts were estimated on the basis of data on inclusions using programs from works (Putirka, 2008; Yavuz, Yıldırım, 2018).

Results. Andesites of the Sulawesi Island were formed with the participation of tholeiitic and calc-alkaline island-arc magmas. Pyroxenes crystallized from melts that evolved with the accumulation of alkalis and silica. Acid magmas, from which plagioclases were formed, are characterized by a decrease in the role of alkalis. Glasses in the groundmass show the participation of acidic melts with a maximum content of alkalis. On the basis of data on the compositions of minerals and glasses (in inclusions and in the groundmass) *PT* - parameters of andesite formation were determined. It was found that pyroxenes crystallized in two intermediate magma chambers (at depths of 27,6-14,6 km and 11,3-7,2 km) at the temperatures from 1150°C to 970°C. The formation of plagioclase phenocrysts occurred in the ranges of 930-910°C and 900-890°C. The crystallization of plagioclase microcrystals in the groundmass proceeded at lower temperatures: 875-865°C, 840-810°C.

Conclusions. The formation of andesites of the Sulawesi Island took place with the participation of island-arc melts, transitional from tholeiites to calc-alkaline and showing some similarity with boninites. Among the andesite-forming magmas, there are (according to the results of the analysis of glasses in the inclusions and in the groundmass) three melts of different composition. Crystallization of pyroxenes from these melts occurred in two magma chambers at depths of 27,6-7,2 km and at a temperature of 1150°C-970°C. Plagioclase was formed at lower temperatures of 930-810°C.

Keywords: *andesites, phenocrysts of clinopyroxene, orthopyroxene and plagioclase, melt inclusions, formation conditions, Sulawesi Island, Indonesia.*

The results of petrochemical, geochemical, and mineralogical studies indicate complicated processes of the formation of andesites of the Sulawesi Island with the participation of island-arc melts, transitional from tholeiites to calc-alkaline, showing a certain similarity with boninites, which indicates the possible influence of magmatism of intraoceanic island arcs. Based on the analysis of the petrographic structure of andesites, it was found that multiphase (Cpx+Opx+Pl) phenocrysts were the first to crystallize. Subsequently, igneous systems were replaced by acidic melts, which served as a source for the formation of monomineral plagioclase phenocrysts. The data on melt inclusions show the possibility of the development of two processes (fractionation of clinopyroxene and mixing with an acid melt) during the formation of andesites of the Sulawesi Island. Studies of glasses in inclusions and in the groundmass indicate the participation of three independent magmatic systems. Inclusions in clino- and orthopyroxenes show the evolution of magmatism with the accumulation of alkalis and silica from andesites to rhyolites. Inclusions in plagioclase indicate the development of acidic magmas, evolving with a decrease in the role of alkalis. Glasses in the groundmass indicate the participation of felsic magma with the maximum alkali content in the transport of phenocrysts. The joint use of data on the compositions of minerals and glasses (in melt inclusions and in the groundmass) made it possible to establish the PT - parameters of the formation of andesites of the Sulawesi Island. It was found that pyroxenes crystallized in two intermediate magma chambers (at depths of 22-11 km and 8.5-3.5 km) at temperatures from 1180°C to 995°C. Crystallization of plagioclase phenocrysts occurred in the ranges of 930-910°C and 900-890°C, while the formation of plagioclase microcrystals in the groundmass proceeded at lower temperatures of 875-865°C, 840-825 and 820-810°C.

Keywords: *andesites, phenocrysts of clinopyroxene, orthopyroxene and plagioclase, melt inclusions, formation conditions, Sulawesi Island, 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 громадными объемами взрывчатого 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 выше, 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 остров Сулавеси (Индонезия), входящей в состав одноименной островной дуги (рис. 1). Несколько зон субдукции и сложные границы плит, а также сосуществование разных островных дуг, делает 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 остров 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 острова Сулавеси до сих пор является предметом дискуссий.

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

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основой для выяснения условий формирования андезитов послужила коллекция эффузивных пород, собранная в северо-восточной части острова Сулавеси (Индонезия). Исследования образцов эффузивов острова Сулавеси проведены в Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск), а также в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (г. Новосибирск).

Петрохимические составы пород острова Сулавеси определены с помощью рентгенофлуоресцентного метода на спектрометре ARL-9900-XP фирмы Thermo Electron Corporation. Для контроля использованы государственные стандартные образцы горных пород (МУ - 1, СТ - 1А и др.). Диапазоны определяемых содержаний (мас. %) следующие: Na₂O - 0.04-15; MgO - 0.05-45; Al₂O₃ - 0.01-30; SiO₂ - 0.01-100; P₂O₅ - 0.01-2; K₂O - 0.01-10; CaO - 0.01-40; TiO₂ - 0.01-2; MnO - 0.01-2; Fe₂O₃ - 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 г/т, для Eu, Ho, Lu - 0.003 г/т, для высокозарядных элементов - 0.09-0.22 г/т.

Вкрапленники клино - и ортопироксенов, а также плагиоклаза из эффузивных пород острова Сулавеси анализировались микрорентгеноспектральным методом, с помощью микроанализатора JEOL JXA-8100 SuperProbe (Королюк 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 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.% 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 x 3 мкм.

Исследования методами термобарогеохимии расплавных включений в минералах из эффузивов острова 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, Слущкий, 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 закалки) 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.

С целью 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 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 использована программа WinPLtb, основанная на соотношениях составов пироксена и расплава, из которого он кристаллизуется (Clinopyroxene-Liquid Thermobarometry) (Yavuz, Yildirim, 2018). Состав расплава был оценен на основе анализа стекол прогретых гомогенизированных включений в изученных пироксенах из андезитов.

Температуры кристаллизации плагиоклаза были 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 ОСТРОВА СУЛАВЕСИ

Остров Сулавеси (Индонезия) имеет сложную геологическую историю развития, что связано с его положением в области коллизии четырех литосферных плит – Индо-Австралийской, Тихоокеанской, Филиппинской и Евразийской. Он образовался в результате столкновения террейнов Азиатской (западная часть острова) и Австралийской (юго-восточная часть острова) плит, а также островной дуги (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 её 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 острова Сулавеси нами исследовались образцы андезитов, отобранные из структур кальдеры Тондоно и вулканической постройки Локон-Эмпунг (рис. 1б). Кальдера Тондоно, представляет собой четвертичную полигенную вулканотектоническую структуру. В настоящее время она является самой крупной кальдерой на севере острова и ее размеры составляют примерно 20 x 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 x 250 м расположенный в седловине между вершинами Локон и Эмпунг. Начиная с 1829 года 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 острова Сулавеси) сложены микрозернистой основной массой, в которой находятся два основных типа вкрапленников. В одном случае это фактически многофазные сростки, состоящие из равномернозернистой ассоциации орто – и клинопироксенов, а также плагиоклаза (рис. 2 а). Широко представлены другие (монофазные) крупные фенокристаллы плагиоклаза (рис. 2 б).

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. 2 в, г). Их расположение достаточно закономерно. В одних случаях лейсты показывают зональное строение стекловатой матрицы с обтеканием расплавом вокруг многофазных вкрапленников. В случае основной массы около мономинеральных вкрапленников плагиоклаза по ориентировке микролейст плагиоклаза в свежем стекле хорошо видно течение расплава между крупными кристаллами (рис. 2 в).

ПЕТРОХИМИЧЕСКИЕ СОСТАВЫ АНДЕЗИТОВ ОСТРОВА СУЛАВЕСИ

Основой при изучении петрохимических особенностей андезитов северо-востока острова Сулавеси послужили оригинальные результаты обработки собранной коллекции (табл. 1) в сравнительном анализе с информацией по известным островодужным объектам. Прежде всего, это представители примитивных (Идзу-Бонинская дуга) и развитых (Курило-Камчатская дуга) островных дуг. К последним относится хорошо изученный вулкан Горелый на Камчатке (Симонов и др., 2021; Gavrilenko и др., 2016), среди структур которого выделяются (как и в случае северо-востока острова Сулавеси) собственно вулканические постройки стратовулканов и более древняя кальдера.

На диаграмме $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})-\text{SiO}_2$ все рассмотренные составы андезитов северо-востока острова Сулавеси располагаются в области пород нормальной щелочности вблизи с полем бонинитов примитивной Идзу-Бонинской островной дуги. При этом эффузивы острова Сулавеси отличаются от пород вулкана Горелый из развитой Курило-Камчатской островной дуги, содержащих заметно больше щелочей (рис. 3 а). Сходство андезитов одновременно с бонинитами Идзу-Бонинской островной дуги и с эффузивами Камчатки отмечается и по другим химическим компонентам (рис. 3 б, в). По соотношению $\text{FeO}^*/\text{MgO} - \text{SiO}_2$ андезиты острова Сулавеси располагаются преимущественно по границе толеитовой и известково-щелочной серий. На диаграмме $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ рассмотренные андезиты острова Сулавеси находятся в области калиево-натриевой серии, где присутствуют и все данные по эффузивам вулкана Горелый. Следует отметить, что часть изученных андезитов попадает в поле бонинитов Идзу-Бонинской островной дуги.

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ АНДЕЗИТОВ ОСТРОВА СУЛАВЕСИ

Особенности геохимии андезитов рассмотрены на основе результатов исследования образцов эффузивов, собранных в северо-восточной части острова Сулавеси. Оригинальные данные по содержанию редких и редкоземельных элементов андезитов приведены в таблицах 2 и 3. Характерные черты поведения редких элементов в андезитах острова Сулавеси хорошо видны на диаграмме $\text{Y}-\text{Zr}$ (рис. 4). Здесь рассмотренные породы большей частью совпадают с данными по эффузивам вулкана Горелый на Камчатке, располагаясь фактически вдоль единого тренда накопления обоих редких элементов в условиях развитой островодужной системы. В то же время часть данных по эффузивам северо-востока острова

Сулавеси содержит минимум элементов и контактирует с полем бонинитов Идзу-Бонинской островной дуги, свидетельствуя о развитии на определенном этапе формирования острова Сулавеси магматических систем примитивных островных дуг (рис. 4).

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

СОСТАВЫ МИНЕРАЛОВ-ВКРАПЛЕННИКОВ В АНДЕЗИТАХ ОСТРОВА СУЛАВЕСИ

При исследовании минералов-вкрапленников в андезитах острова Сулавеси анализировались преимущественно участки около находящихся в них расплавных включений. Учитывая важность данных по составам минералов для выяснения условий магматических систем, также были проанализированы не содержащие включения клино – и ортопироксены (а также сосуществующие с ними плагиоклазы) из многофазных вкрапленников.

Клинопироксены в андезитах острова Сулавеси обычно совместно с ортопироксенами входят в состав многофазных вкрапленников. Судя по их взаимоотношениям (см. рис. 2 а), эти пироксены кристаллизовались, скорее всего, одновременно. При этом ассоциирующие с пироксенами плагиоклазы ведут себя более независимо. Составы изученных вкрапленников клинопироксена приведены в таблице 4. По соотношению миналов (En-Wo-Fs) вкрапленники клинопироксена в андезитах острова 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 $SiO_2/100-TiO_2-Na_2O$ клинопироксены из андезитов острова Сулавеси располагаются компактной группой, перекрывая поля минералов из известково-щелочных и толеитовых пород островных дуг. На диаграмме TiO_2-FeO клинопироксены из андезитов острова Сулавеси располагаются 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 острова Сулавеси. По содержанию целого ряда других элементов (Ti, Cr, Ca, Al) клинопироксены из андезитов острова Сулавеси показывают явно островодужную геодинамическую обстановку и развитие переходных серий от толеитов к известково-щелочным.

Ортопироксены из андезитов острова Сулавеси (табл. 5) по соотношению миналов (En-Wo-Fs) относятся к гиперстену. Судя по отношениям $TiO_2-Mg\#$ и $Al_2O_3-Mg\#$ ортопироксены из андезитов острова Сулавеси явно истощены титаном, алюминием и обладают заметно меньшей магнезиальностью по сравнению с ортопироксенами из эффузивов вулкана Горелый. Эти особенности связаны с повышенными содержаниями железа в пироксенах из андезитов.

Плагиоклазы из андезитов острова Сулавеси образуют вкрапленники, находящиеся в одних случаях в тесном срастании с клино – и ортопироксенами («многофазные вкрапленники») (см. рис. 2 а), а в других – формируют более крупные хорошо ограненные мономинеральные кристаллы (см. рис. 2 б), с многочисленными расплавными включениями.

Также плагиоклазы широко распространены в основной массе андезита в виде удлиненных микрокристалликов (рис. 2 в, г).

Анализ составов плагиоклазов из андезитов (табл. 6) показал, что принципиальных различий вкрапленников, находящихся в тесной ассоциации с пироксенами и располагающимися 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 %) и мономинеральных вкрапленников (An 45-59 %) практически совпадают и соответствуют андезину и лабрадору в отличие от плагиоклазовых лейстов из основной массы (An 46-78 %), имеющих более широкий состав от андезина до битовнита. Фенокристаллы плагиоклаза из андезита острова Сулавеси обладают минимальными значениями ортоклазового компонента (Or 0.8-1.6 %) по сравнению с данными по лейстам из основной массы (Or 0.9-3.4 %).

На диаграмме K_2O -An составы плагиоклазов из многофазных и мономинеральных вкрапленников фактически перекрываются, показывая несущественные различия в значениях анортитового компонента. При этом, плагиоклазовые лейсты из основной массы андезита образуют тренд с повышенными содержаниями калия и значений An, располагаясь в целом между данными по вкрапленникам плагиоклаза из андезитов острова Сулавеси и эффузивами вулкана Горелый на Камчатке (рис. 8).

РАСПЛАВНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ В МИНЕРАЛАХ АНДЕЗИТОВ ОСТРОВА СУЛАВЕСИ

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

В клинопироксене первичные расплавные включения (размерами 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. 9 а).

При нагреве в микротермокамере до 900°C никаких заметных изменений во включениях в клинопироксене не происходит. Около 1080°C клинопироксен темнеет. В районе 1175°C содержимое отдельных включений становится гомогенным. 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, закаливая систему резким отключением электронагревателя. После прогрева и закалки во включениях преобладает гомогенное стекло, содержащее небольшой газовый пузырек (рис. 9 б).

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

В ходе экспериментов ортопироксен начинает темнеть при 1085°C. При дальнейшем нагреве, также как и в случае клинопироксена, вся матрица с вкрапленником темнеет и начинает плавиться. Для отдельных включений удалось установить температуры гомогенизации - 1170°C, близкие к результатам по включениям в клинопироксене. 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. 9 г).

В случае **плагиоклаза** наиболее детально были исследованы включения в отдельных самостоятельных вкрапленниках. Первичные расплавные включения (размерами 5-25-50

мкм) равномерно заполняют центры кристаллов и располагаются прямолинейными полосами, связанными с двойниками и зонами роста. Включения обладают отчетливой огранкой и сложены преимущественно стеклом с газовым пузырьком (рис. 9 е). Реже присутствуют многофазные (микрозернистые) темные включения.

В ходе экспериментов в микротермокамере при повышении температуры от 830°C 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 плагиоклазе происходят достаточно быстро – в течение менее 10 мин.

Необходимо отметить, что повышение температуры свыше 1100°C приводит 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 размерами менее 20 мкм, содержащим только гомогенное стекло либо стекло с газовым пузырьком относительно меньшего размера, чем отмечено для исходного состояния включений (рис. 9 д, е).

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

В целом, результаты анализов гомогенных стекол прогретых и закаленных включений во вкрапленниках пироксенов и плагиоклаза (табл. 7, 8, 9) послужили основой для выяснения физико-химических условий формирования андезитов острова Сулавеси. При этом большое значение имеет сравнительный анализ составов экспериментально полученных гомогенных стекол в прогретых включениях с данными по природно закаленным стеклам из основной массы андезита (табл. 10).

На диаграмме $(Na_2O+K_2O)-SiO_2$ все данные по стеклам прогретых и гомогенизированных расплавных включений из рассмотренных минералов (также как и составы эффузивов острова Сулавеси) находятся в области пород нормальной щелочности. При этом включения в пироксенах (также как и породы) показывают тренд накопления щелочей на фоне роста SiO_2 , в корне отличающийся от характера распределения компонентов во включениях из плагиоклаза, для которых наблюдается падение щелочей. Природно закаленные стекла основной массы по значительному количеству SiO_2 (77-79 мас.%) совпадают с данными по стеклам 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 K_2O-SiO_2 все данные по включениям и эффузивам острова Сулавеси (также как и включения в пироксенах вулкана Горелый) относятся к сериям с умеренной калиевостью. Также как и для суммы щелочей, можно отметить два разнонаправленных тренда: с ростом калия (включения в пироксенах) и с падением этого элемента (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 вулкана Горелый. В другой группе с минимальными содержаниями элементов находятся все включения в плагиоклазе. Сравнительный анализ с информацией по распределению кальция и магния в расплавах вулкана Горелый, приведенной в работе (Gavrilenko et al., 2016), показывает возможность двух магматических процессов при формировании андезитов острова Сулавеси. Прежде всего, это фракционирование клинопироксена («Cpx fractionation», рис. 11) в исходном расплаве. Кристаллизация этого минерала приводит к падению кальция и магния в расплаве. Как показано для вулкана Горелый (Gavrilenko et al., 2016) значительную роль могут играть процессы смешения («Mixing») базальтовых и дацитовых магматических систем. Распределение данных по расплавным включениям на рис. 11 показывают возможность развития этих двух процессов и при формировании андезитов острова Сулавеси. При этом включения в клинопироксене фиксируют составы исходных магм. Данные по включениям в орто – и клинопироксенах отражают эволюцию расплавов (с падением CaO с 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 острова Сулавеси хорошо видны на вариационных диаграммах, несущих информацию о распределении большинства петрохимических компонентов. Тренды расплавных включений в пироксенах, начинаясь от поля включений в пироксенах из базальтовых пород вулкана Горелый, отмечают падение титана, железа, магния, кальция и накопление алюминия и натрия на фоне роста SiO₂. Составы расплавных включений в плагиоклазе показывают противоположную тенденцию по сравнению с включениями в пироксенах: увеличение содержания титана и железа при одновременном падении алюминия и натрия на фоне роста SiO₂. Таким образом, установленное на примере щелочей в составе включений (рис. 10) участие при формировании андезитов острова Сулавеси двух типов расплавов подтверждается с привлечением и других химических компонентов.

Исследования летучих компонентов с помощью КР-спектроскопии и РСМА согласно методике (Котов и др., 2021) позволили установить содержания 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 SiO₂ (не нормированные данные – 71 мас.% → 75 мас.% → 79–80 мас.%) падает соответственно количество H₂O: 4.62 мас.% → 3.67–2.59 мас.% → 1.95 мас.%.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты комплексных исследований андезитов северо-востока острова Сулавеси с помощью петролого-геохимических, минералогических и термобарогеохимических методов свидетельствуют о сложной истории формирования и развития магматизма островной дуги Сулавеси.

В частности петрографические данные о структуре андезитов говорят о нескольких этапах формирования этих пород. Первый этап отразился в кристаллизации многофазных (Cpx+Orx+Pl) вкрапленников. При этом, как показано в результате анализа расплавных включений, активную роль играли андезитовые магмы. В дальнейшем идет проникновение расплава с высоким содержанием SiO₂, несущего крупные вкрапленники плагиоклаза (с расплавными включениями 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 острова 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 островных дуг при формировании андезитов острова Сулавеси.

Данные по расплавному включениям в минералах-вкрапленниках показывают возможность развития двух магматических процессов (фракционирование пироксена и смешение с кислым расплавом) при формировании андезитов острова Сулавеси, подобных установленным ранее для вулкана 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) говорят о смешении с кислой магмой. Наличие кислых включений в плагиоклазе, свидетельствующих о смешении магматических систем при формировании эффузивов современных островных дуг, отмечается и другими исследователями (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 свидетельствуют о том, что формирование андезитов острова Сулавеси происходило при участии трех самостоятельных магматических систем. Включения во вкрапленниках пироксенов показывают закономерную эволюцию магматизма с накоплением щелочей и кремнезема (также как и составы эффузивов северо-востока острова 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 говорят об участии кислых магм с максимальным содержанием щелочей в транспортировке ранее образованных вкрапленников.

Для определения условий кристаллизации вкрапленников клинопироксена и ортопироксена из андезита острова 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. Содержания воды в расплаве были оценены в результате сравнения данных по расплавному включениям в пироксенах и плагиоклазах. Исследования составов стекол включений в этих минералах показали их сходство в диапазонах содержаний SiO_2 70–75 мас. % (рис. 10). При этом установлены содержания воды в стеклах включений (минимум 2.6 мас. % при SiO_2 70–75 мас. %) во вкрапленниках плагиоклаза. Именно эти данные по количеству H_2O нами вполне обосновано 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 были 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 (27.6–21.2 км) уровнях, 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 данные 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 вулкана Горелый, Камчатка (Симонов и др., 2021).

На основе данных по составам плагиоклазов и находящихся в них расплавных включений по программе (Putirka, 2008) были 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 острова Сулавеси происходила в интервалах температур 930–910°C и 900–890°C. Эти параметры заметно ниже температур гомогенизации включений 1090–1120°C. Учитывая то, что в ходе экспериментов прогрев свыше 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 микролейст плагиоклаза в основной массе из андезитов острова Сулавеси. Основой расчетов послужили оригинальные данные по составам микрокристаллов плагиоклаза и находящегося между ними природного стекла. Содержание воды оценивалось с учетом полученной нами информацией по стеклам прогретых расплавных включений во вкрапленниках плагиоклаза, непосредственно контактирующих со стеклом основной массы андезита. Соответственно для стекол основной массы с SiO₂ около 73 мас. % содержание воды принималось 4.6 мас. %, а для стекол с SiO₂ около 75 мас. % – H₂O 3.1 мас.%. В результате установлено три температурных интервала кристаллизации кристалликов плагиоклаза в основной массе андезитов острова Сулавеси: 875–865°C, 840–825 и 820–810°C.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Результаты петрохимических, геохимических и минералогических исследований говорят о сложных процессах формирования андезитов острова Сулавеси при участии островодужных расплавов, переходных от толеитов к известково-щелочным, показывая при этом определенное сходство с бонинитами, что свидетельствует о возможном участии магматизма примитивных островных дуг.

2. Петрографические данные о структуре андезитов острова 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 плагиоклаза.

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

4. В целом исследования стекол во включениях и в основной массе свидетельствуют о формировании андезитов острова Сулавеси 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 понижением роли щелочей. Стекла в основной массе говорят об участии 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 в основной массе позволили установить PT – параметры формирования андезитов острова Сулавеси. Было выяснено, что пироксены кристаллизовались в двух промежуточных магматических очагах (на глубинах 27.6–14.6 км и 11.3–7.2 км) при температурах от 1150°C до 970°C. Образование вкрапленников плагиоклаза происходило в интервалах 930–910°C и 900–890°C, а кристаллизация микрокристаллов плагиоклаза в основной массе шла при температурах 875–865°C, 840–825 и 820–810°C. В общем, кристаллизация минералов в андезитах происходила с задержками при постоянных давлениях в промежуточных очагах и существенном падении температуры, что способствовало процессам фракционирования и смешения расплавов.

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

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., 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>

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/GiG2019100>

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. DOI: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 палеоспрединга. М.: ГЕОС, 249 с.

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. <http://dx.doi.org/10.15372/GiG20151005>

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). *Материалы IX Всероссийской конференции с международным участием. Петрология магматических и метаморфических комплексов*. Томск: Томский центр научно-технической информации, 333-338.

Низаметдинов И.Р. (2022) Петрогенезис посткальдерных вулканитов кальдеры Медвежья на примере вулкана Меньший Брат, о. Итуруп. Автореферат дис. ... канд. геол.-мин. наук. Новосибирск: ИГМ СО РАН, 23 с.

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

- острова). *Доклады Академии наук*. **468**(1), 93-97. <https://doi.org/10.31857/S0869-5652486193-97>
- Петрографический кодекс России. (2009) Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования. Издание третье, исправленное и дополненное. Санкт-Петербург, Издательство 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 расплавленным 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. *Материалы первой Всероссийской научной конференции, посвященной памяти академика РАН Н.Л. Добрецова. Добрецовские чтения: Наука из первых рук*. 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.
- 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. Program, Scient. Results*. **125**, 143-169.
- Boynnton W.V. (1984) Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. *Rare earth element geochemistry*. In P. Henderson (ed.). 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. DOI: 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 collapse. *Bulletin Volcanology*. **78**(7), 1-28.
- Global Volcanism Program (2022) Database Volcanoes of the World v. 5.0.0. In 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. [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. *Bulletin Volcanology*. **74**(7), 1581-1609. DOI: 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. *Proceedings of the Ocean Drilling Program Scientific 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. *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. [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>

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. Program, Scient. Results*. **125**, 143-169.
- Boynton W.V. (1984) Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. *Rare earth element geochemistry*. In P. Henderson (ed.). 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. DOI: 10.1007/978-3-540-88558-0_5
- 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), 1265-1291. (In Russ) <http://dx.doi.org/10.15372/GiG20160701>
- Dobretsov N.L., Simonov V.A., Koulakov I.Yu., Kotlyarov A.V. (2017) Migration of fluids and melts in subduction zones and general aspects of thermophysical modeling in geology. *Russian Geology and Geophysics*. **58** (5), 701–722. (In Russ) <https://doi.org/10.15372/GiG20170503>
- 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. *Russian Geology and Geophysics*. **60** (10), 1353-1383. (In Russ) <https://doi.org/10.15372/GiG2019100>
- 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. *Bulletin Volcanology*. **78**(7), 1-28.
- Global Volcanism Program (2022) Database Volcanoes of the World v. 5.0.0. In 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. [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., Buhtiyarov 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. *Bulletin Volcanology*. **74**(7), 1581-1609.
- Kuzmin M.I. (1985) *Geochemistry of igneous rocks of the Phanerozoic mobile belts*. Novosibirsk: Nauka, 198 p. (In Russ)

- Kurenkov S.A., Didenko A.N., Simonov V.A. (2002) Geodynamics of paleospreading. M.: GEOS, 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. *Proceedings of the Ocean Drilling Program Scientific 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., 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.
- 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., Kuzmin 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 Sciences*. **486** (1), 525-528. <https://doi.org/10.31857/S0869-5652486193-97>
- 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). *Proceedings of OIGGM*. 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. *Russian Geology and Geophysics*, (**62**) 1, 103-133 (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/GiG2020164>
- 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. *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. *Geology geophysics*. (12), 97-110.
- 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. [dx.doi.org/10.1016/j.jseas.2017.02.005](https://doi.org/10.1016/j.jseas.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>

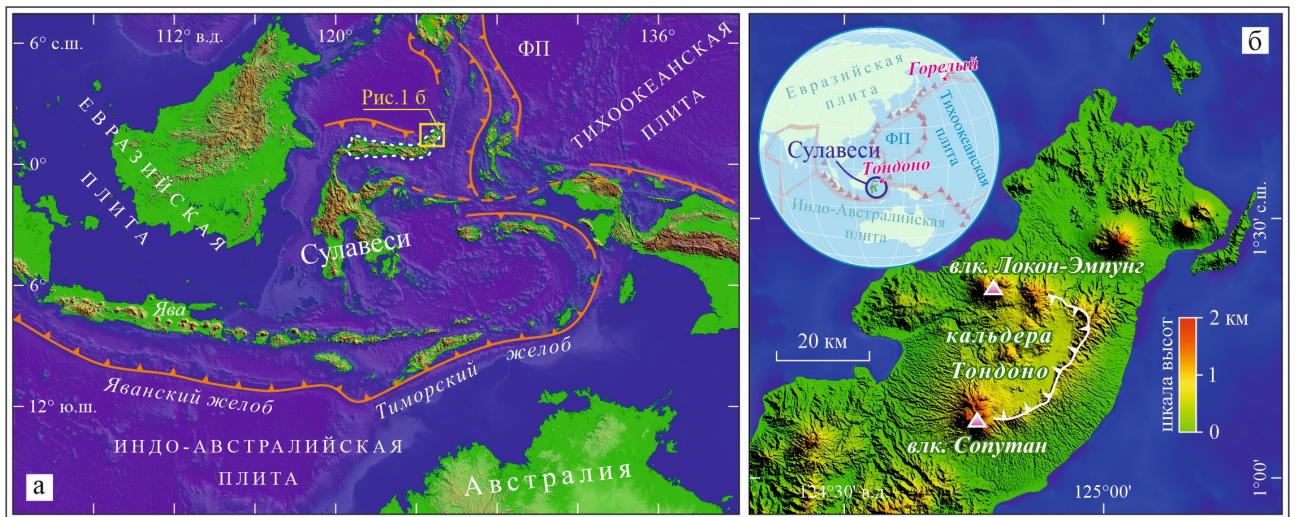


Рис. 1. Тектоническая схема Индонезийского архипелага (а), и положение кальдеры Тондоно на северо-востоке острова Сулавеси (б).

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

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

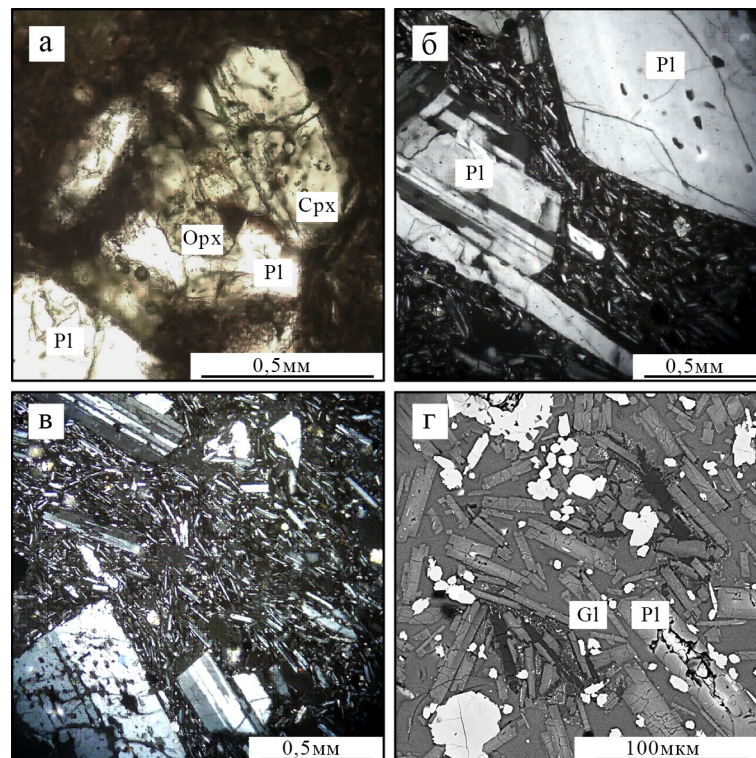


Рис. 2. Многофазные (а, Срх – клинопироксен, Орх – ортопироксен, Pl - плагиоклаз) и однофазные (б, Pl – плагиоклаз) вкрапленники в андезите острова Сулавеси. Проходящий свет. Строение основной массы андезита (в, г, Gl – стекло, Pl – плагиоклаз): в – проходящий свет, г – вид в отраженных электронах.

Fig. 2. Multiphase (a, Срх – clinopyroxene, Орх – orthopyroxene, Pl – plagioclase) and single-phase (b, Pl – plagioclase) phenocrysts in andesite of the Sulawesi Island. Transmitted light.

Structure of the groundmass of andesite (c, d, Gl – glass, Pl – plagioclase): c – transmitted light, d – view in reflected electrons.

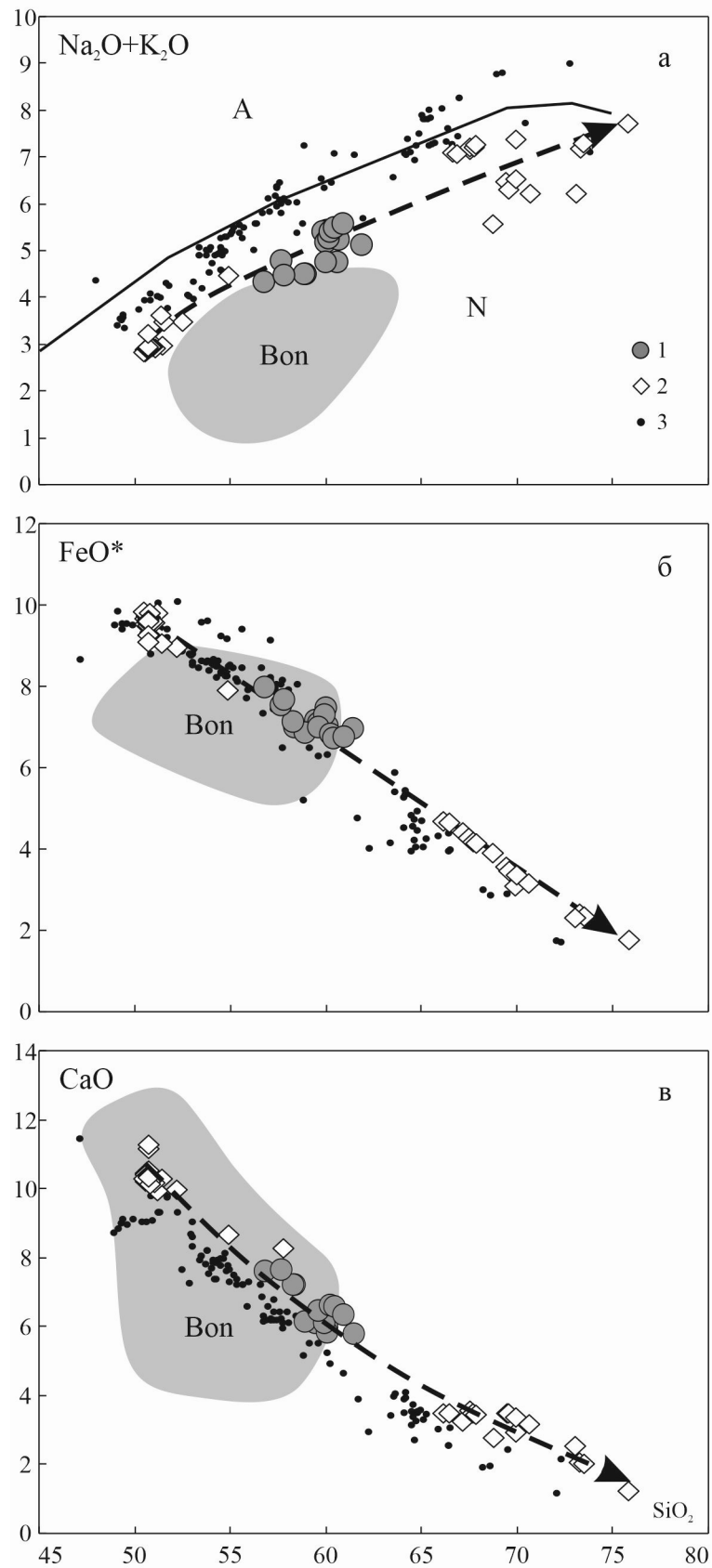


Рис. 3. Диаграммы (Na₂O+K₂O)–SiO₂, FeO*–SiO₂, CaO–SiO₂ для эффузивов острова Сулавеси (мас. %).

1 – андезиты острова Сулавеси; 2 – эффузивные породы северо-востока острова Сулавеси; 3 – эффузивы вулкана Горелый, Камчатка. Bon – поле бонинитов Идзу-Бонинской островной дуги. Породы: щелочные (A) и нормальной (N) щелочности. Составы пород пересчитаны на 100%. FeO* – общее железо. Рисунок построен на основе оригинальных данных с использованием материалов из работ (Петрографический кодекс, 2009; Arculus et al., 1992; Murton et al., 1992; Kushendratno et al., 2012; Gavrilenko и др., 2016).

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 effusives from the island of Sulawesi (wt. %).

1 – andesites of the Sulawesi Island; 2 - effusive rocks of the northeast of the Sulawesi Island; 3 - effusive rocks of the Gorely volcano, Kamchatka. Bon - is the boninite field of the Izu-Bonin island arc. Rocks: alkaline (A) and normal (N) alkalinity. Rock compositions are recalculated by 100%. FeO* is total iron. The figure was constructed on the basis of original data using materials from works (Petrographic Code, 2009; Arculus et al., 1992; Murton et al., 1992; Kushendratno et al., 2012; Gavrilenko et al., 2016).

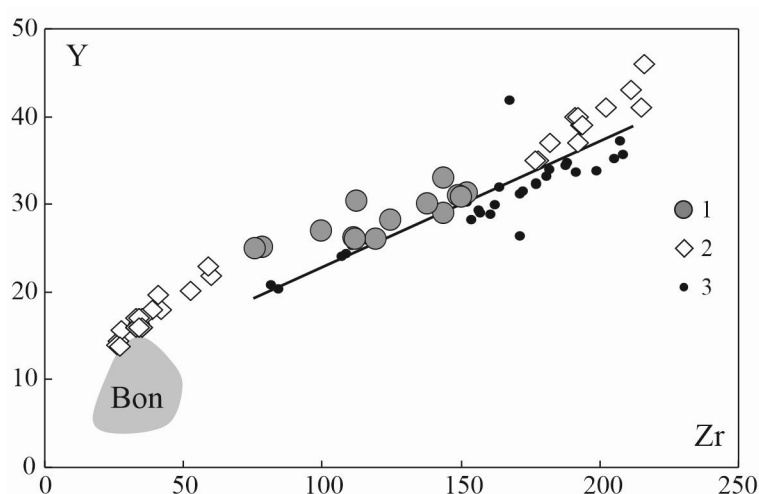


Рис. 4. Диаграмма Y–Zr для эффузивов острова Сулавеси (г/т).

1 – андезиты острова Сулавеси; 2 – эффузивные породы северо-востока острова Сулавеси; 3 – эффузивы вулкана Горелый, Камчатка. Bon – поле бонинитов Идзу-Бонинской островной дуги. 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).

Fig. 4. Y–Zr diagram for effusives from the Sulawesi Island (ppm).

1 – andesites of the Sulawesi Island; 2 - effusive rocks of the northeast of the Sulawesi Island; 3 – effusive rocks of the Gorely volcano, Kamchatka. Bon - is the boninite field of the Izu-Bonin island arc. 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).

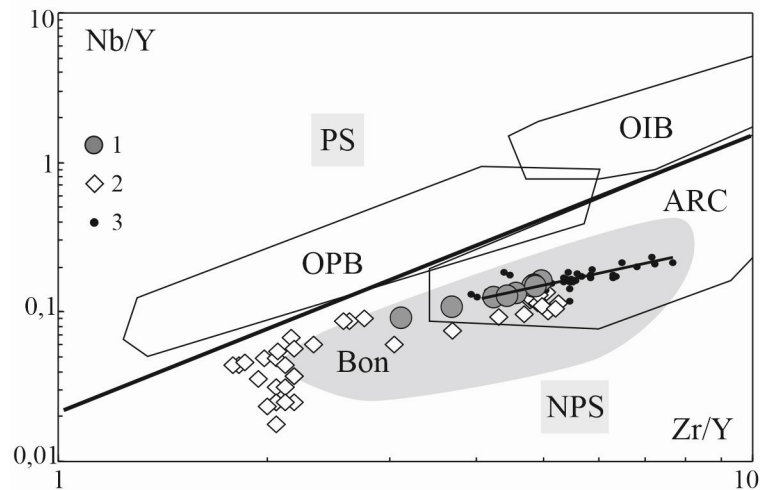


Рис. 5. Диаграмма Nb/Y–Zr/Y для эффузивов острова Сулавеси.

Области пород с плюмовым источником (PS) и без плюмового источника (NPS). Поля пород: Bon – бониниты Идзу-Бонинской островной дуги, OPB – океанические платобазальты, OIB – базальты внутриплитных океанических островов, ARC – базальты островных дуг. Остальные условные обозначения см. на рис. 4. 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).

Fig. 5. Diagram Nb/Y–Zr/Y for effusives from the Sulawesi Island.

Rock areas with a plume source (PS) and without a plume source (NPS). Rock fields: Bon - boninites of the Izu-Bonin island arc, OPB - oceanic plateau basalts, OIB - intraplate oceanic island basalts, ARC - island arc basalts. For other symbols, see fig. 4. 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).

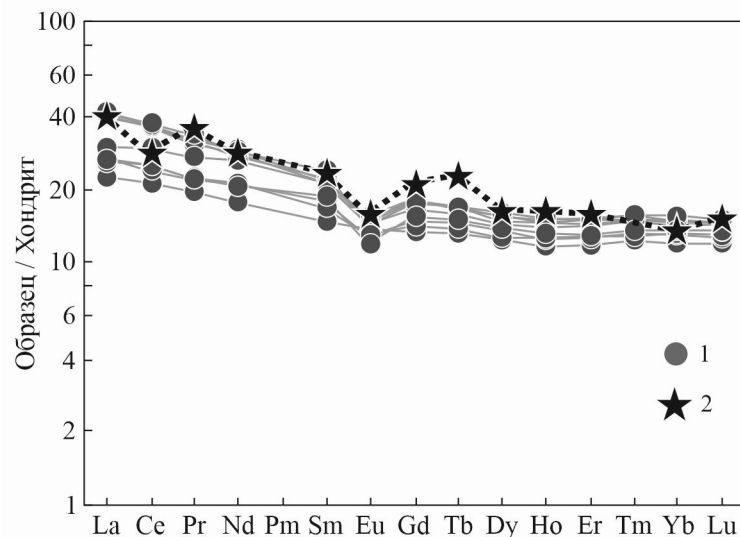


Рис. 6. Распределение редкоземельных элементов в андезитах острова Сулавеси.

1 – оригинальные анализы андезитов острова Сулавеси; 2 – андезиты известково-щелочной серии (Кузьмин, 1985). Значения элементов нормированы к 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 (Kuzmin, 1985). Element values are normalized to chondrite according to (Boynnton, 1984).

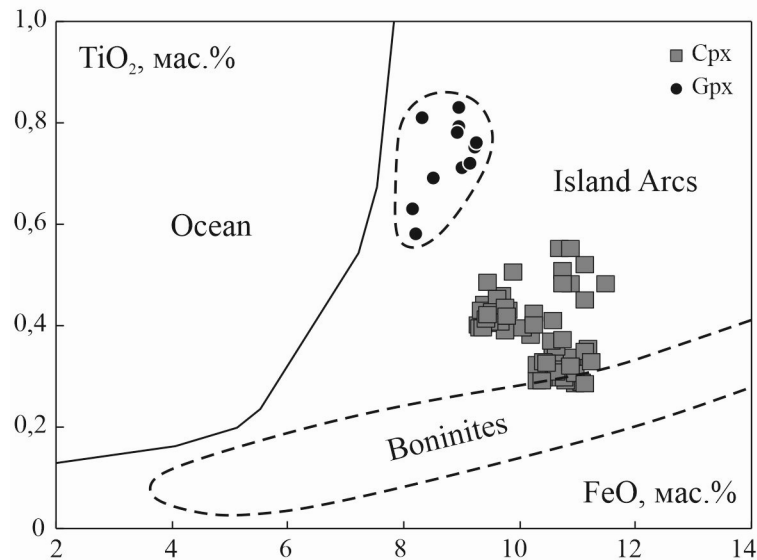


Рис. 7. Диаграмма $\text{TiO}_2\text{--FeO}$ для вкрапленников клинопироксена.

Клинопироксены из андезитов острова Сулавеси (Срх) и из базальтовых пород вулкана Горелый (Грх). Поля клинопироксенов: Ocean – из океанических эффузивных пород; Island Arcs – из островодужных эффузивных пород; Boninites – из бонинитов. Рисунок построен на основе оригинальных данных с использованием материалов из работ (Куренков и др., 2002; Симонов и др., 2021).

Fig. 7. $\text{TiO}_2\text{--FeO}$ diagram for clinopyroxene phenocrysts.

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

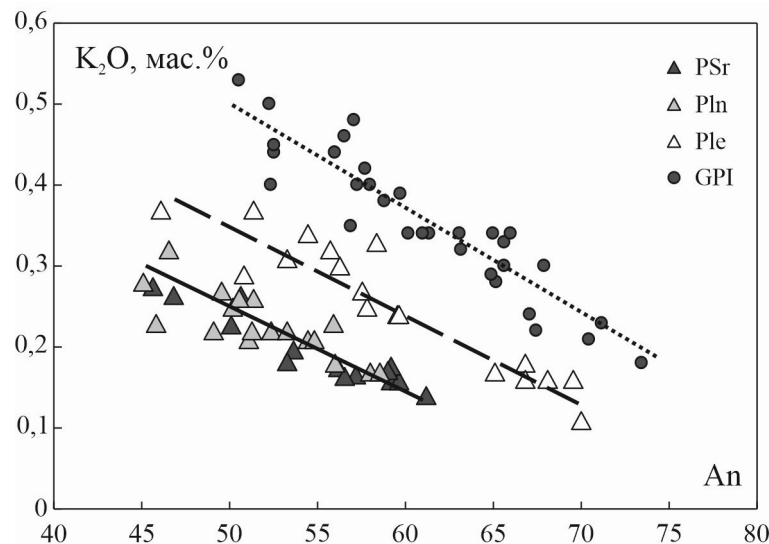


Рис. 8. Диаграмма $\text{K}_2\text{O}\text{--An}$ для вкрапленников плагиоклаза из андезитов острова Сулавеси.

Плагиоклазы в андезитах острова Сулавеси: из многофазных вкрапленников (PSr), из вкрапленников с изученными расплавленными включениями (Pln), из основной массы (Ple). Вкрапленники плагиоклаза в базальтовых породах вулкана Горелый, Камчатка (GPI). Рисунок построен на основе оригинальных данных с использованием материалов из работы (Симонов и др., 2021).

Fig. 8. $\text{K}_2\text{O}\text{--An}$ diagram for plagioclase phenocrysts from andesites of the Sulawesi Island.

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

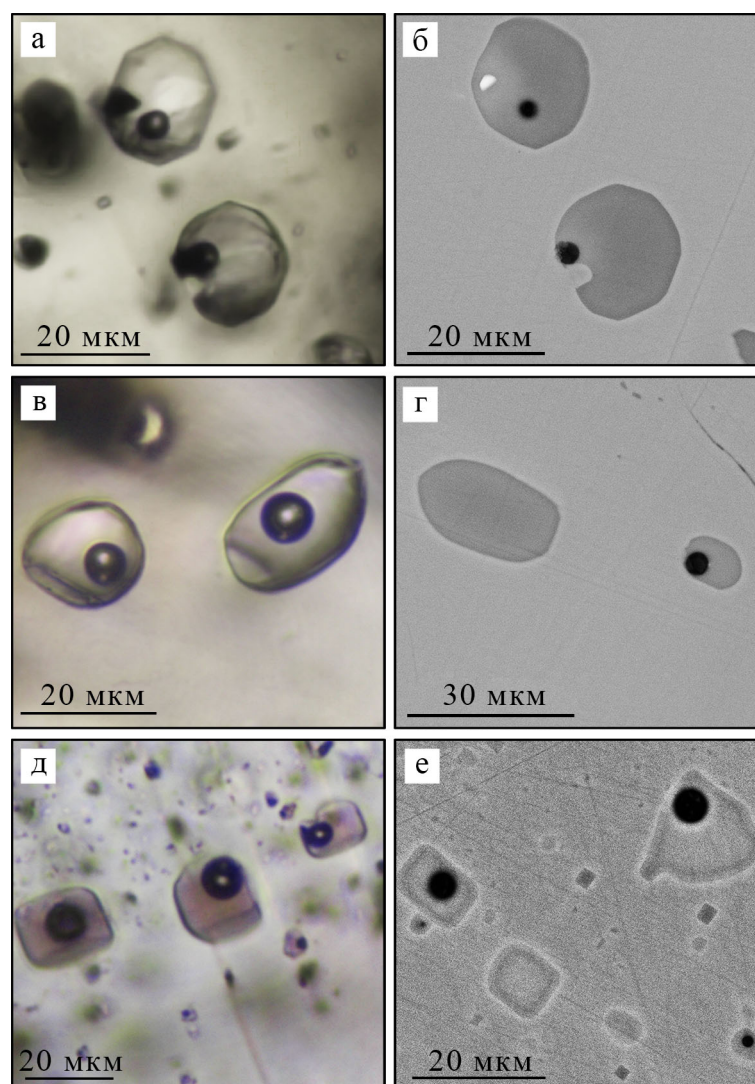


Рис 9. Расплавные включения: в клинопироксене (а, б), в ортопироксене (в, г), в плагиоклазе (д, е).

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, b), in orthopyroxene (c, d), in plagioclase (e, f).

a, c, e – unheated inclusions. Images in transmitted light.

b, d, f – after high-temperature experiments and hardening. Images in reflected electrons.

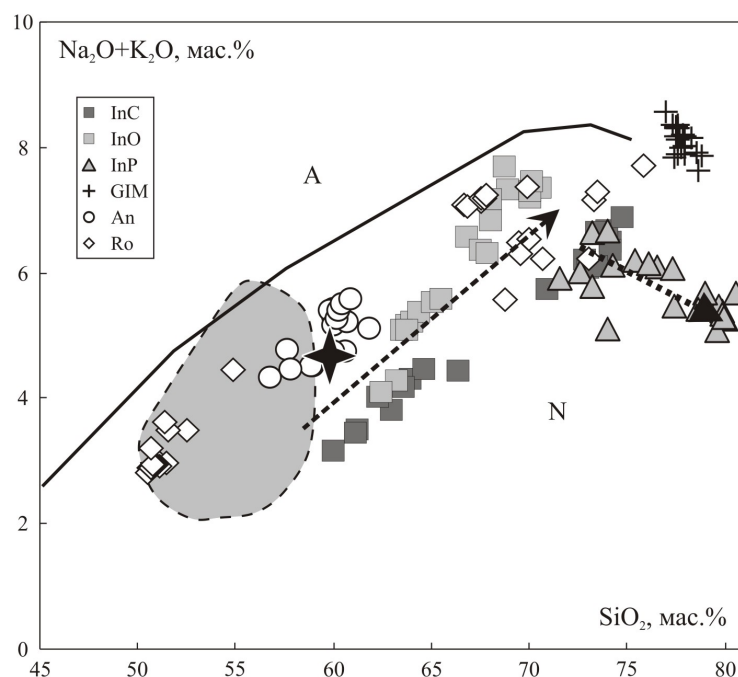


Рис. 10. Диаграмма $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})\text{-SiO}_2$ для стекол прогретых и гомогенизированных расплавных включений.

Включения в клинопироксене (InC), в ортопироксене (InO), в плагиоклазе (InP) из андезитов острова Сулавеси. GIM – стекло из основной массы андезита. An – андезиты острова Сулавеси. Ro – эффузивные породы северо-востока острова Сулавеси. Тренды включений в пироксенах (пунктир) и в плагиоклазе (точечный). Области щелочных (A) и нормальных (N) пород. Серое поле – данные по включениям преимущественно в клинопироксене из базальтовых пород вулкана Горелый (Камчатка). Звезда – состав детально изученного образца андезита. Составы пород и включений пересчитаны на 100%. Рисунок построен на основе оригинальных данных с использованием материалов из работ (Петрографический кодекс, 2009; Симонов и др., 2021; Kushendratno et al., 2012).

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

Inclusions in clinopyroxene (InC), orthopyroxene (InO), plagioclase (InP) from andesites of the Sulawesi Island. GIM - glass from the groundmass of andesite. An - andesites of the Sulawesi Island. Ro - effusive rocks of the northeast of the Sulawesi Island. Inclusion trends in pyroxenes (dotted line) and plagioclase (point). Areas of alkaline (A) and normal (N) rocks. 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%. The figure was constructed on the basis of original data using materials from works (Petrographic Code, 2009; Simonov et al., 2021; Kushendratno et al., 2012).

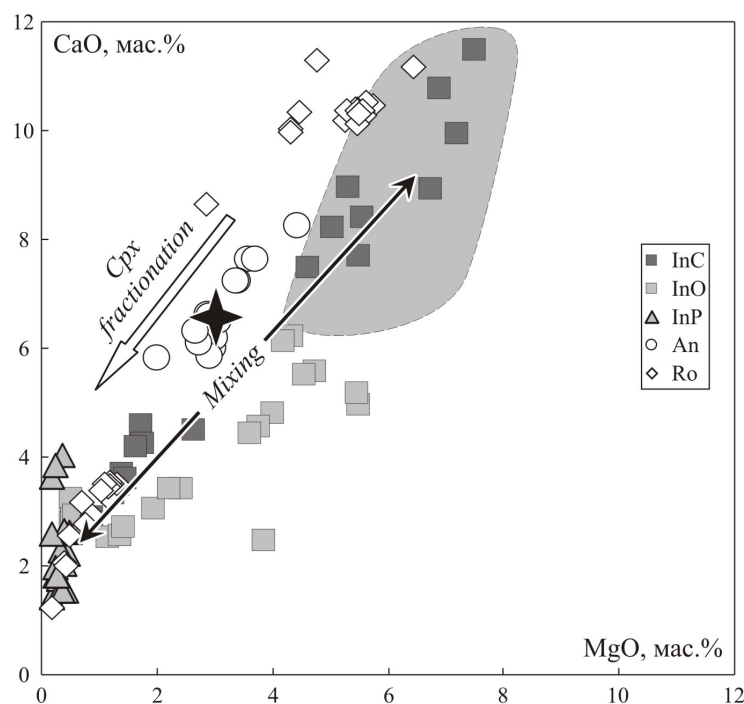


Рис. 11. Диаграмма CaO–MgO для стекол прогретых и гомогенизированных расплавных включений.

Включения в клинопироксене (InC), в ортопироксене (InO), в плагиоклазе (InP) из андезитов острова Сулавеси. An – андезиты острова Сулавеси. Ro – эффузивные породы северо-востока острова Сулавеси. Серое поле – данные по включениям преимущественно в клинопироксене из базальтовых пород вулкана Горелый (Камчатка). Звезда – состав детально изученного образца андезита. «Cpx fractionation» – фракционирование клинопироксена. «Mixing» – смешение расплавов. Составы пород и включений пересчитаны на 100%. Рисунок построен на основе оригинальных данных с использованием материалов из работ (Симонов и др., 2021; Kushendratno et al., 2012; Gavrilenko et al., 2016).

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

Inclusions in clinopyroxene (InC), orthopyroxene (InO), plagioclase (InP) from andesites of the Sulawesi Island. An - andesites of the Sulawesi Island. Ro - 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%. The figure was constructed on the basis of original data using materials from works (Simonov et al., 2021; Kushendratno et al., 2012; Gavrilenko et al., 2016).

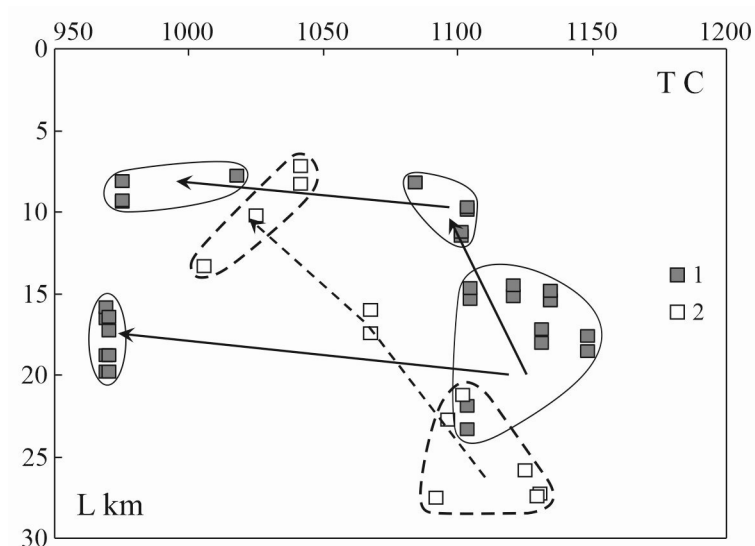


Рис. 12. Условия кристаллизации минералов из андезитов острова Сулавеси в промежуточных магматических очагах.

1 – данные по вкрапленникам клинопироксена и находящимся в них расплавленным включениям; 2 - данные по вкрапленникам ортопироксена и находящимся в них расплавленным включениям. Параметры кристаллизации пироксенов: глубина (L km) и температура (T C – T°C).

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. Pyroxene crystallization parameters: depth (L km) and temperature (T C - T°C).

ТАБЛИЦЫ

Таблица 1. Представительные анализы (мас.%) андезитов острова Сулавеси.

Table 1. Representative analyses (wt.%) of andesites of Sulawesi Island.

№ п/п	№ образца	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

Таблица 2. Содержание редких элементов (г/т) в андезитах острова Сулавеси.

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

№ п/п	№ образца	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 (г/т) в андезитах острова Сулавеси.

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

№ п/п	№ образца	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

Таблица 4. Представительные анализы вкрапленников клинопироксена (мас.%) из андезитов острова Сулавеси.

Table 4. Representative analyses (wt.%) of clinopyroxene phenocrysts from andesites 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	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.

Таблица 5. Представительные анализы вкрапленников ортопироксена (мас.%) из андезитов острова Сулавеси.

Table 5. Representative analyses (wt.%) of orthopyroxene phenocrysts from andesites 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	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.

Таблица 6. Представительные анализы плагиоклазов (мас.%) из андезитов острова Сулавеси.

Table 6. Representative analyses (wt.%) of plagioclases from andesites 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	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 плагиоклаза из многофазных вкрапленников; 9-18 – составы мономинеральных вкрапленников плагиоклаза рядом с расплавленными включениями; 19-30 – составы микрокристаллов плагиоклаза 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.

Таблица 7. Представительные анализы (мас.%) стекол прогретых и гомогенизированных расплавленных включений в клинопироксене из андезитов острова Сулавеси.

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

№ 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 расплавленных включений (мас.%) в ортопироксене из андезитов о-ва Сулавеси.

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

№ 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

Таблица 9. Представительные анализы стекол прогретых и гомогенизированных расплавных включений (мас.%) в плагиоклазе из андезитов о-ва Сулавеси.

Table 9. Representative analyses (wt.%) of glasses of heated and homogeneous melt inclusions in plagioclase from andesites of Sulawesi Island.

№ 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 (мас.%) природно закаленных стекол в основной массе андезитов о-ва Сулавеси.

Table 10. Representative analyses (wt.%) of natural quenched glasses in groundmass from andesites 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	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

