

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ БАЗАЛЬТОВ  
ВУЛКАНА ЛОКОН, ОСТРОВ СУЛАВЕСИ (ТИХИЙ ОКЕАН): ДАННЫЕ ПО  
РАСПЛАВНЫМ ВКЛЮЧЕНИЯМ**

***Н.В. Дмитриева<sup>1</sup>, В.А. Симонов<sup>1</sup>, И.Ю. Сафонова<sup>1,2,3</sup>, А.В. Котляров<sup>1</sup>, Н.С. Карманов<sup>1</sup>***

<sup>1</sup>*Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, просп. Академика Коптюга 3, г. Новосибирск, 630090; e-mail: kotlyarov@igm.nsc.ru*

<sup>2</sup>*Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, ул. Пирогова 1, г. Новосибирск, 630090*

<sup>3</sup>*Юго-западный университет Джаотонг, Чэнду, Кунмай (Southwest Jiaotong University, China)*

Поступила в реакцию 13 декабря 2022 г.

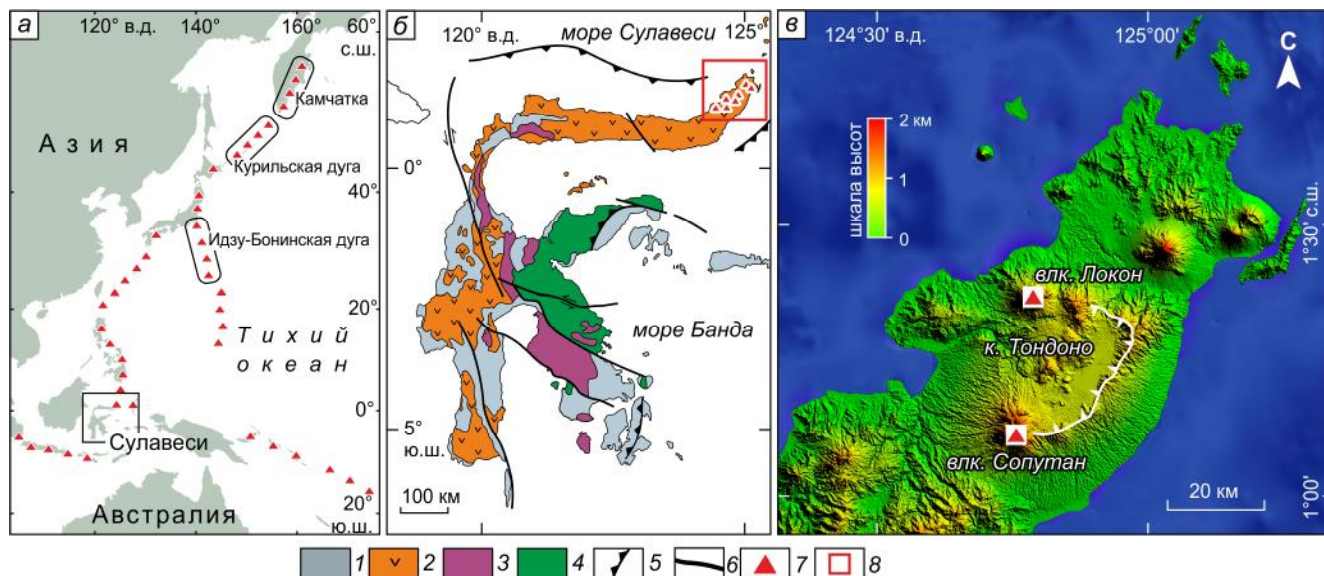
Для установления физико-химических условий петрогенезиса базальтов острова Сулавеси (ЮЗ часть Тихоокеанского субдукционного пояса) были исследованы вкрапленники и расплавные включения. Составы вкрапленников клинопироксена и плагиоклаза в базальтах вулкана Локон свидетельствуют о том, что в их образовании участвовали два типа расплавов: примитивный и дифференцированный. Из «примитивной» магмы образовались плагиоклазы с высокими значениями анортитового компонента, отсутствующие в андезитах вулкана Локон. Из расплава второго типа образовались однотипные для базальтов и андезитов клинопироксены и плагиоклазы. Данные по составам гомогенных стекол расплавных включений в минералах аналогичны данным, полученным для других вулканов острова Сулавеси и ЮЗ части Тихого океана, что позволяет предположить похожие Р-Т условия формирования магматических систем. В частности, данные по включениям показывают, что для базальтовых магм вулканов Сопутан и Локон характерны «примитивные» составы ( $\text{SiO}_2 = 48.2\text{--}51.5$  мас. % и MgO до 8 мас. %), что согласуется с содержанием других оксидов. Составы включений располагаются на вариационных диаграммах в начале «андезитовых» трендов. Соответственно эти расплавы могут быть исходными для развития всей магматической системы, сформировавшей андезит-базальтовые эффузивы кальдеры Тондоно и вулканов Локон и Сопутан. На основе совместного применения данных по составам расплавных включений и минералов-хозяинов установлены два уровня глубин кристаллизации клинопироксена (20.6–14.5 км, 1150–1130 °С и 13–6 км, 1145–1105 °С), а также температуры образования плагиоклаза (1160–1120 °С) в базальтах вулкана Локон. В целом, результаты исследования включений и минералов свидетельствуют о принципиальных различиях РТХ – параметров магматических систем, формировавших базальты и андезиты острова Сулавеси. Клинопироксен в базальтах формировался из выдержанных по составу расплавов в ходе незначительного уменьшения температур при непрерывном и существенном падении давления в процессах подъема магмы. Кристаллизация минералов в андезитах происходила по другой схеме – с задержками при постоянных давлениях в глубинных промежуточных очагах и значительном падении температуры, что способствовало процессам фракционирования и эволюции расплавов.

**Ключевые слова:** базальты, клинопироксены, плагиоклазы, расплавные включения, остров Сулавеси, Тихий океан.

## ВВЕДЕНИЕ

Исследования вулканов с кальдерами в современных островодужных областях представляют не только научный интерес, но имеют и большое практическое значение из-за возможных последствий ка-

тастрофических извержений. В связи с этим, остров Сулавеси на западе Тихого океана, в северо-восточной части которого находятся три постоянно действующих с середины 20 века [15, 25] и активных в настоящее время вулкана (Сопутан, Локон и Каран-



**Рис. 1.** Схема геологического строения острова Сулавеси.

Рис. 1, а – построен на основе [36] с изменениями и дополнениями авторов. Рис. 1, б – по [29] с изменениями и дополнениями авторов. Рис. 1, в – по [26] с изменениями и дополнениями авторов. 1 – кайнозойские и позднемезозойские осадочные породы; 2 – кайнозойские вулканические и плутонические породы; 3 – метаморфические породы; 4 – офиолитовый комплекс; 5 – надвижки; 6 – разломы; 7 – активные вулканы; 8 – северо-восточная часть острова Сулавеси с современными вулканами.

гетанг), заслуживает самого пристального внимания. Наибольший интерес для выяснения особенностей кальдерного магматизма острова Сулавеси имеет изучение взаимосвязанных структур кальдеры Тондоно и вулканов Локон и Сопутан (рис. 1).

Остров Сулавеси расположен в одном из наиболее тектонически сложных регионов Мира. Он находится около соединения трех глобальных литосферных плит – Евразийская плита на западе, Тихоокеанская плита на востоке и Австрало-Индийская плита на юго-востоке [24]. Предыдущие исследования в районе острова Сулавеси показали сложные взаимодействия различных тектонических плит, а также выделили несколько зон коллизии и субдукции [16, 18], что делает выяснение строения и условий формирования вулканогенных комплексов в этом регионе весьма затруднительным.

Многие исследователи отмечают сложное строение самого острова Сулавеси [13, 24, 29]. Северная часть этого острова состоит главным образом из современных вулканических комплексов. В его южной части, наряду с вулканогенными образованиями, широко развиты метаморфические и офиолитовые ассоциации (рис. 1). В связи с этим условия формирования различных структур острова Сулавеси до сих пор являются предметом дискуссий.

Расположенные в северо-восточной части острова Сулавеси структуры вулканов Сопутан,

Локон и кальдеры Тондоно исследовались ранее, и сейчас есть достаточно представительные данные о породах и минералах из вулканогенных комплексов этого района [15, 20, 23, 25–27, 30, 35]. В частности, значительный по объему материал, содержащий информацию по составам оливинов и находящихся в них включений стекла в эффузивах вулкана Сопутан, приведен в работе [25]. В то же время многие вопросы, связанные с условиями образования базальтовых комплексов северо-востока острова Сулавеси, остаются открытыми. Наши исследования вулканов Камчатки [2, 3, 8] свидетельствуют о том, что перспективным путем для выяснения условий формирования эффузивных островодужных комплексов является изучение расплавных включений в минералах. Несомненно, необходима также информация о составах минералов и пород. В целом, наша работа посвящена выяснению физико-химических условий образования базальтов северо-восточной части острова Сулавеси с помощью петролого-геохимических, минералогических и термобарогеохимических (анализ расплавных включений) методов. Основой исследований послужили образцы эффузивных пород, отобранные Сафоновой И.Ю.

#### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Аналитические исследования базальтов острова Сулавеси проведены в Институте геологии и мине-

ралогии 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 эффузивных пород острова Сулавеси определены с помощью рентгенофлуоресцентного метода на спектрометре ARL-9900-XP фирмы Thermo Electron Corporation. Для контроля использованы стандартные образцы горных пород (MU – 1, CT – 1A и др.). Диапазоны определяемых содержаний (мас. %) следующие: Na<sub>2</sub>O – 0.04–15; MgO – 0.05–45; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 0.01–30; SiO<sub>2</sub> – 0.01–100; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 0.01–2; K<sub>2</sub>O – 0.01–10; CaO – 0.01–40; TiO<sub>2</sub> – 0.01–2; MnO – 0.01–2; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 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 минералов анализировались микрорентгеноспектральным методом, с помощью микроанализатора JEOL JXA-8100 SuperProbe. Результаты проведенных нами анализов содержаний основных элементов на этом приборе превышают пределы обнаружения. В связи с этим установленные количества элементов являются достоверными.

Составы стекол включений и минералов-хозяинов около включений определены на электронном сканирующем микроскопе MIRA 3 LMU [(Tescan Orsay Holding) с системой микроанализа INCA Energy 450+ XMax 80 (Oxford Instruments Nanoanalysis Ltd)] при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе электронного пучка 1.5 нА и живом времени набора спектров 20 с. При данных условиях анализа погрешность определения основных компонентов ( $C \geq 10$ –15 мас. %) не превышает 1 отн. %. Погрешность определения компонентов с концентрациями 1–10 мас. % лежит в диапазоне 2–6 отн. % и не превышает 10 отн.%. При концентрациях вблизи предела обнаружения (0.2–0.3 мас. %) погрешность может достигать величины 20 отн. % [5].

Исследования методами термобарогеохимии расплавных включений в минералах выполнены в лаборатории геодинамики и магматизма ИГМ СО РАН. Эксперименты по гомогенизации расплавных включений при высоких температурах проводились в микротермокамере с инертной средой [10] согласно методикам [7, 34].

Для определения *PT* – условий образования вкрапленников пироксена использована программа

WinPLtb, основанная на соотношениях составов пироксена и расплава, из которого он кристаллизуется (Clinopyroxene-Liquid Thermobarometry) [37], и содержащая целый набор термометров и барометров [28, 32]. Состав расплава был оценен на основе анализа стекол прогретых включений в изученных пироксенах.

Температуры кристаллизации плагиоклаза рассчитаны по программе [33] с использованием составов вкрапленников и стекол прогретых расплавных включений.

#### ПЕТРОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ БАЗАЛЬТОВ ОСТРОВА СУЛАВЕСИ

Остров Сулавеси (Индонезия) располагается в западной части глобального вулканического пояса Тихого океана (рис. 1, а). Отличительной особенностью острова является его сложное строение с разделением на южный и северный сегменты, резко различающиеся по набору пород (рис. 1, б). В южном фрагменте распространенные в его западной части кайнозойские вулканические породы сменяются к востоку метаморфическими и офиолитовыми комплексами. Здесь картина похожа на ситуацию в Камчатском регионе, где вулканы сменяются на восточной окраине полуострова офиолитами, в частности изученными нами на Камчатском мысу [7].

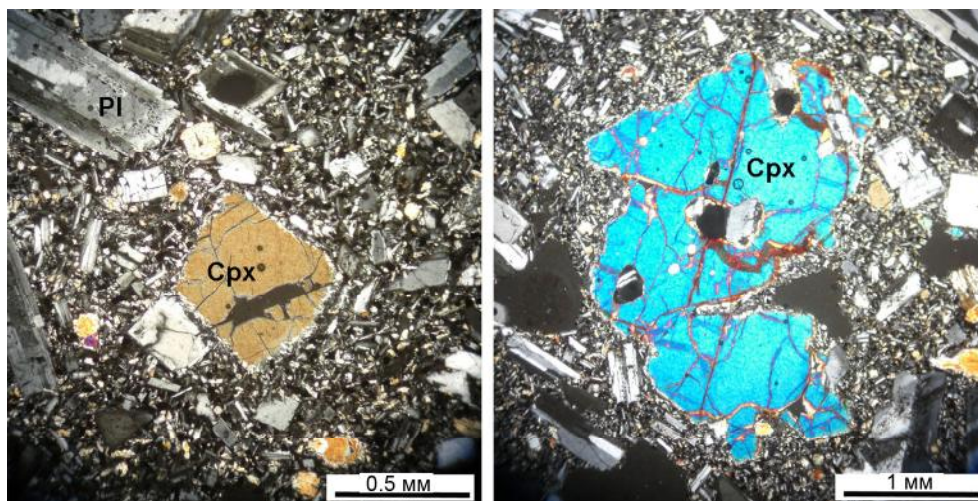
В северных районах острова Сулавеси присутствуют исключительно кайнозойские вулканические комплексы. На самом северо-востоке находятся современные активные вулканические постройки (рис. 1, в), цепочка которых прослеживается до южного окончания Филиппинской дуги [22, 38].

Основное внимание при выяснении условий образования базальтов острова Сулавеси было уделено результатам исследования эффузивов вулканов Локон и Сопутан (рис. 1, в). Эти вулканы активны до настоящего времени [15, 25]. С целью сравнительного анализа привлекались оригинальные данные по эффузивам кальдеры Тондоно [1, 9], образующей совместно с вулканами Локон и Сопутан фактически единую вулканогенную структуру.

Наиболее детально исследовались оригинальные образцы базальтов, отобранные на склонах вулкана Локон, располагающегося (как и вулкан Сопутан) на границе кальдеры Тондоно (рис. 1, в).

#### Петрографические особенности базальтов

Строение базальтов вулкана Локон на острове Сулавеси определяется взаимоотношениями микрозернистой основной массы с вкрапленниками преимущественно клинопироксена и плагиоклаза. Для основной массы с микроделеритовой структурой



**Рис. 2.** Структура базальтов вулкана Локон.

Pl – плагиоклаз. Cpx – клинопироксен.

характерно явное преобладание кристаллитов плагиоклаза и клинопироксена с крайне незначительной ролью стекла. В этой равномернозернистой (без признаков течения) матрице располагаются мелкие (до 1 мм) вкрапленники в основном клинопироксена и плагиоклаза (рис. 2), а также значительно более редкие (такого же размера) фенокристаллы оливина и ортопироксена. Еще реже в мелкозернистой массе изученного базальта встречаются наиболее крупные (до 4 мм) вкрапленники клинопироксена и плагиоклаза (рис. 2).

В целом, строение базальта свидетельствует о его быстром (эффузивном) и одноактном происхождении. При этом ситуация была достаточно спокойной, что привело к фактически одновременной кристаллизации фенокристаллов клинопироксена и плагиоклаза в равномернозернистой микроделеритовой основной массе.

#### Особенности химического состава базальтов

Основой при изучении особенностей составов базальтов северо-востока острова Сулавеси послужили результаты обработки собранной коллекции, а также опубликованные данные по породам вулканов Локон и Сопутан, а также кальдеры Тондоно [26], 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 [8, 21], среди структур которого выделяются (как и в случае северо-востока острова Сулавеси) собственно вулканические постройки и более древняя кальдера.

Оригинальные данные по составам рассмотренных базальтов северо-востока острова Сулавеси приведены в таблице 1.

На диаграмме  $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) - \text{SiO}_2$  составы базальтов вулкана Локон формируют совместно с базальтами вулкана Сопутан фактически одну группу с минимальными содержаниями щелочей и располагаются в области пород нормальной щелочности рядом с полем бонинитов западной части Тихого океана. Совместно с андезитами и дацитами они образуют единый тренд (находясь в его начале) накопления щелочей и  $\text{SiO}_2$ , характерный для эффузивов северо-востока острова Сулавеси и проходящий параллельно границе разделения пород с повышенной и нормальной щелочностью (рис. 3).

По соотношению  $\text{FeO}^*/\text{MgO} - \text{SiO}_2$  изученные базальты острова Сулавеси относятся к толеитовой серии, а согласно  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} - \text{SiO}_2$  – принадлежат к натриевой серии, в отличие от андезитов и дацитов, располагающихся в области калиево-натриевой серии.

На диаграмме  $\text{Y} - \text{Zr}$  базальты вулканов Локон и Сопутан (как и в случае петрохимических данных) образуют фактически одну группу с минимумом элементов, ассоциирующую с полем бонинитов. Другие, более кислые разновидности пород северо-востока острова Сулавеси практически совпадают с эффузивами вулкана Горелый на Камчатке, фигуративные точки их составов располагаются вдоль тренда накопления обоих редких элементов (рис. 4) в условиях развитой островодужной системы.

По соотношению  $\text{Zr}/\text{Nb} - \text{Nb}/\text{Th}$  базальты и другие эффузивы северо-востока острова Сулавеси и вулкана Горелый (Камчатка) находятся в поле остро-

Таблица 1. Представительные анализы составов базальтов острова Сулавеси.

№ п/п	№ образца	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	П.п.п.	Сумма
1	Ind-05-18	52.17	0.88	18.26	9.93	0.18	4.29	9.96	2.70	0.76	0.19	0.00	99.40
2	Ind-06-18	51.41	0.88	18.70	10.05	0.18	4.46	10.28	2.81	0.65	0.19	-0.07	99.63
3	Ind-07-18	51.19	1.00	18.23	10.89	0.19	4.28	9.94	2.94	0.67	0.21	-0.42	99.20

№ п/п	№ образца	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Cs	Ba	Hf	Ta	Th	U
3	Ind-05-18	17.5	413	22	60	1.98	0.74	115	1.71	0.16	1.62	0.37
4	Ind-06-18	13.8	417	20	53	1.75	0.62	102	1.50	0.12	1.42	0.33
5	Ind-07-18	15.3	396	23	59	1.98	0.63	111	1.73	0.12	1.80	0.33

№ п/п	№ образца	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
3	Ind-05-18	7.2	17.3	2.4	10.9	3.3	1.00	3.3	0.57	3.6	0.77	2.2	0.34	2.2	0.33
4	Ind-06-18	6.4	15.5	2.3	10.4	2.9	0.94	3.0	0.53	3.3	0.69	2.0	0.32	2.0	0.32
5	Ind-07-18	7.8	18.3	2.5	11.8	3.0	1.16	3.4	0.62	3.9	0.81	2.3	0.37	2.4	0.36

Примечание. Образцы для исследований отобраны на склонах вулкана Локон. Общий состав – мас.%. Редкие и редкоземельные элементы – г/т.

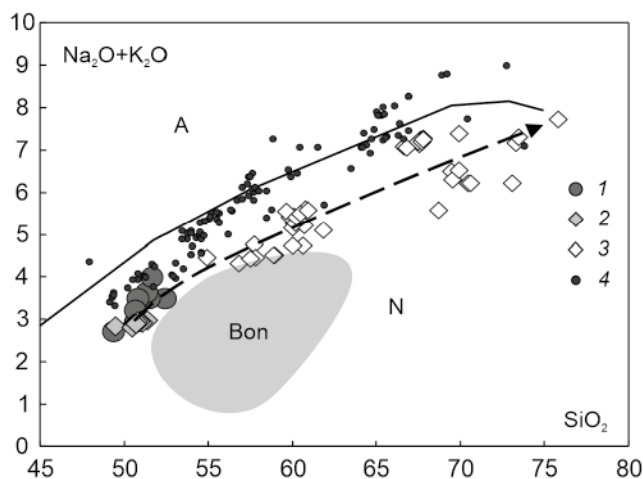


Рис. 3. Диаграмма (Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O) – SiO<sub>2</sub> (мас.%) для базальтов острова Сулавеси.

1 – базальты вулкана Локон (использованы аналитические данные авторов и из работ [20, 26, 30]); 2 – базальты вулкана Сопутан (использованы аналитические данные из работ [26, 27]); 3 – другие эффузивные породы северо-востока острова Сулавеси (использованы аналитические данные авторов и из работ [20, 26]); 4 – эффузивы вулкана Горелый, Камчатка (использованы аналитические данные из работы [21]). Bon – поле бонинитов Идзу-Бонинской островной дуги (построено на основе аналитических данных из работ [14, 31]). Серии пород: щелочные (А) и нормальной (N) щелочности. Сплошная линия – граница между сериями пород (по [6] с изменениями). Пунктиром обозначен тренд эффузивных пород северо-востока острова Сулавеси. Составы пород пересчитаны на 100 %.

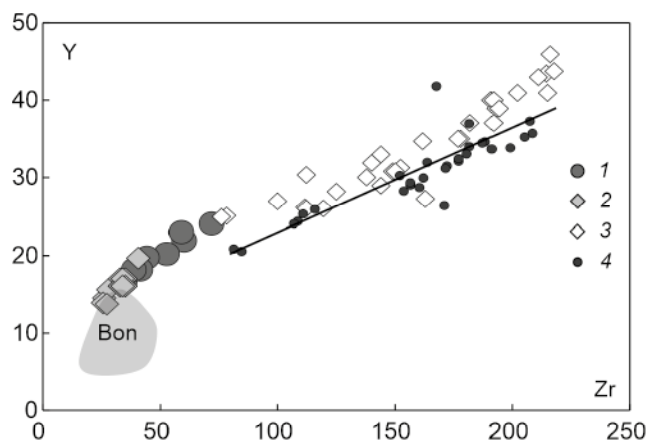
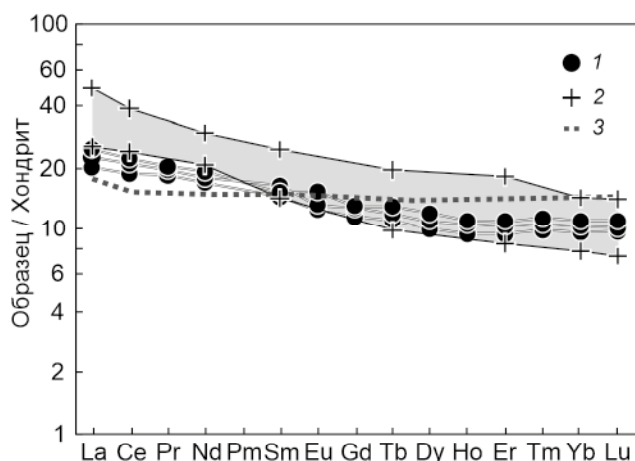


Рис. 4. Диаграмма Y – Zr (г/т) для базальтов острова Сулавеси.

1 – базальты вулкана Локон (использованы аналитические данные авторов и из работ [20, 26, 30]); 2 – базальты вулкана Сопутан [25, 26]; 3 – эффузивные породы северо-востока острова Сулавеси (использованы аналитические данные авторов и из работ [20, 26]); 4 – эффузивы вулкана Горелый, Камчатка (использованы аналитические данные из работы [21]). Bon – поле бонинитов Идзу-Бонинской островной дуги (построено на основе аналитических данных из работ [14, 31]). Сплошная линия – тренд составов эффузивных пород вулкана Горелый, Камчатка.

воздушных пород в ассоциации с бонинитами, резко отличаясь от базальтов типа NMORB.

По характеру распределения редкоземельных элементов базальты северо-востока острова Сулавеси близки к полю базальтов известково-щелочной серии



**Рис. 5.** Распределение редкоземельных элементов в базальтах острова Сулавеси.

1 – оригинальные анализы базальтов острова Сулавеси; 2 – поле базальтов известково-щелочной серии (построено на основе аналитических данных из работы [12]); 3 – верхняя граница поля островодужных толеитовых базальтов (построена на основе аналитических данных из работы [12]). Значения элементов нормированы к хондриту согласно [17].

и имеют определенные черты сходства с островодужными толеитовыми базальтами (рис. 5).

#### СОСТАВЫ МИНЕРАЛОВ В БАЗАЛЬТАХ ОСТРОВА СУЛАВЕСИ

Исследования базальтовых образцов, отобранных на склонах вулкана Локон, позволили установить составы целого ряда минералов, образующих вкрапленники. Были проанализированы фенокристаллы оливина, клинопироксена, ортопироксена и плагиоклаза.

**Оливины** встречаются довольно редко в изученных базальтах и представлены обычно мелкими (около 1 мм) прозрачными вкрапленниками, часто диагностированными только в результате анализа состава минерала (табл. 2).

На диаграммах CaO – Fo и MnO – Fo оливины из базальта вулкана Локон по своему составу попадают в основную группу оливинов из эффузивов вулкана Сопутан и образуют фактически единый тренд с оливинами из пород вулкана Горелый на Камчатке (рис. 6).

**Клинопироксены** в базальтах острова Сулавеси присутствуют в виде вкрапленников и микрокристалликов в основной массе. Детально исследовались вкрапленники, содержащие расплавные включения. Проанализированы также фенокристаллы без расплавных включений. Составы изученных вкрапленников клинопироксена приведены в таблице 3.

По соотношению миналов (En-Wo-Fs) вкрапленники клинопироксена в базальтах вулкана Локон на

острове Сулавеси относятся к авгиту, их составы совпадают в значительной мере с составами пироксенов из андезитов этого острова и близки к данным по клинопироксенам из базальтовых пород вулкана Горелый на Камчатке.

На диаграммах зависимости распределения в клинопироксенах химических компонентов от магнезиальности можно проследить эволюцию магматической системы при снижении содержания магния в расплаве с ростом концентраций титана и падением – алюминия в ходе кристаллизации клинопироксенов в базальтах. При этом часть данных по клинопироксенам в андезитах острова Сулавеси хорошо согласуется с информацией по пироксенам в базальтах. В то же время существует группа клинопироксенов из андезита с пониженными содержаниями титана, алюминия и противоположным поведением (падением)  $TiO_2$  при снижении магнезиальности (рис. 7). В общем мы видим, что клинопироксены в базальтах (образующие фактически одну компактную группу) кристаллизовались из единого эволюционирующего расплава, в отличие от клинопироксенов в андезитах, часть из которых образовывалась совместно с «базальтовыми» пироксенами, а другая часть формировалась при участии иной магмы.

В целом клинопироксены в базальтах острова Сулавеси содержат повышенные количества титана и железа, и по соотношениям ряда элементов (Ti, Cr, Ca, Al) показывают явно островодужную обстановку и развитие в основном известково-щелочных серий.

**Ортопироксены** в базальтах (табл. 4) острова Сулавеси по соотношению миналов (En-Wo-Fs) относятся к гиперстену, что практически совпадает с данными по пироксенам в андезитах этого острова, и их фигуративные точки располагаются в поле ортопироксенов в базальтовых породах вулкана Горелый на Камчатке.

На диаграммах  $TiO_2 - Mg\#$  и  $Al_2O_3 - Mg\#$  (рис. 7) ортопироксены в базальтах острова Сулавеси занимают промежуточное положение между полями ортопироксенов в андезитах этого острова и ортопироксенов в базальтовых породах вулкана Горелый (Камчатка).

**Плагиоклазы** в базальтах острова Сулавеси образуют вкрапленники, которые, судя по степени ограненности и расположению в основной массе, кристаллизовались одновременно с фенокристаллами клинопироксена. Анализировались составы вкрапленников плагиоклаза, как содержащих расплавные включения, так и без включений (табл. 5).

По соотношению Ab – Or – An вкрапленники плагиоклаза в базальтах острова Сулавеси в связи с

Таблица 2. Представительные анализы (мас. %) вкрапленников оливина в базальтах вулкана Локон.

№ п/п	№ анализа	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	Сумма	Fo
1	140	36.88	0.00	0.00	25.50	0.50	37.91	0.18	0.00	100.97	72.02
2	149	38.16	0.02	0.00	20.67	0.36	40.44	0.18	0.03	99.86	77.22
3	150	38.28	0.00	0.03	20.57	0.39	40.06	0.18	0.01	99.51	77.11
4	151	38.19	0.01	0.02	21.79	0.39	39.21	0.19	0.09	99.89	75.71
5	152	38.13	0.00	0.01	22.66	0.46	38.57	0.20	0.00	100.02	74.62
6	153	38.05	0.01	0.04	22.71	0.43	38.43	0.20	0.00	99.88	74.53
7	154	38.38	0.03	0.01	21.65	0.40	39.10	0.18	0.00	99.74	75.76
8	155	38.33	0.00	0.03	22.31	0.43	38.64	0.19	0.00	99.93	74.97

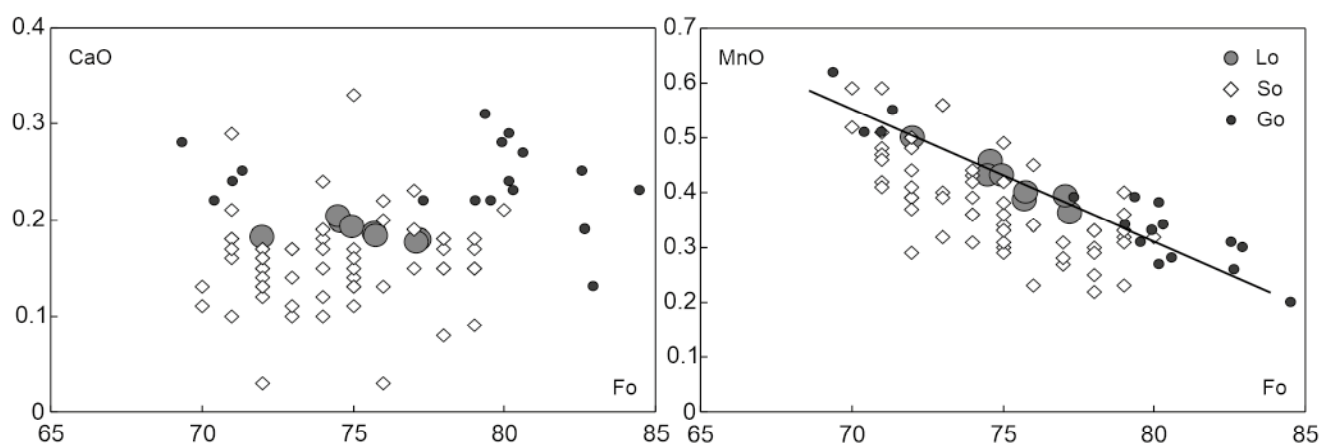


Рис. 6. Диаграммы CaO – Fo и MnO – Fo (мас.%) для вкрапленников оливина из базальтов вулкана Локон.

Оливины: в базальтах вулкана Локон (Lo); в эффузивах вулкана Сопутан (So) (использованы аналитические данные из работы [25]); в базальтовых породах вулкана Горелый, Камчатка (Go) [8]. Сплошная линия – тренд составов оливинов из пород вулкана Горелый, Камчатка (построен на основе аналитических данных из работы [8]).

незначительными содержаниями калия (Ог до 1.36) располагаются вдоль линии Ab – An, разбиваясь на две группы: 54–68 An (лабрадор) и 86–92 An (битовнит-анортит). При этом, плагиоклазы из первой группы (лабрадоры) перекрываются данными по плагиоклазам в андезитах острова Сулавеси и в базальтовых породах вулкана Горелый.

На диаграмме K<sub>2</sub>O – An (рис. 8) вкрапленники плагиоклаза в базальтах и андезитах острова Сулавеси формируют фактически единый тренд падения содержания калия с ростом анортитового компонента. При этом часть плагиоклазов в базальтах (с относительно максимальными количествами K<sub>2</sub>O и минимумом An) перекрывается с данными по минералам в андезитах, а другие – образуют отдельную группу с минимумом калия и максимальными значениями An (битовнит-анортит). Таким образом, вкрапленники плагиоклаза в базальтах острова Сулавеси кристаллизуются из двух типов расплавов – «базальтовых» (битовнит-анортит) и «андезитовых» (лабрадор).

#### РАСПЛАВНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ В МИНЕРАЛАХ

Основной объем данных о физико-химических условиях образования базальтов острова Сулавеси был получен с помощью изучения расплавных включений во вкрапленниках клинопироксена и плагиоклаза. Наиболее детально были рассмотрены расплавные включения в минералах из базальтов вулкана Локон.

**В клинопироксене** первичные расплавные включения (5–10–25 мкм) располагаются в основном равномерно по вкрапленнику, а также по зонам роста кристалла. Наблюдается некоторая огранка в форме включений. До высокотемпературных экспериментов многофазные включения содержат светлое стекло (обычно по краям), анизотропные кристаллические фазы, темные рудные кристаллики и флюидный пузырь (рис. 9, а).

В процессе нагрева в микротермокамере при 970 °С содержимое включений становится более

Таблица 3. Представительные анализы (мас. %) вкрапленников клинопироксена в базальтах вулкана Локон.

№ п/п	№ анализа	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Сумма
1	79	51.76	0.56	1.68	0.00	12.33	0.45	14.96	18.25	0.00	0.00	99.99
2	81	51.92	0.53	1.53	0.00	12.70	0.44	15.17	17.71	0.00	0.00	100.00
3	85	50.90	0.68	2.24	0.00	13.14	0.49	15.23	17.05	0.26	0.00	99.99
4	91	51.85	0.49	1.52	0.00	12.62	0.52	15.91	16.85	0.25	0.00	100.01
5	97	51.86	0.43	1.55	0.00	12.82	0.43	15.24	17.41	0.25	0.00	99.99
6	103	51.34	0.64	2.58	0.00	11.58	0.44	15.09	18.33	0.00	0.00	100.00
7	105	51.95	0.53	1.49	0.00	13.12	0.45	15.31	17.14	0.00	0.00	99.99
8	112	51.73	0.62	2.05	0.00	11.82	0.44	15.54	17.81	0.00	0.00	100.01
9	113	51.78	0.49	1.52	0.00	13.19	0.45	15.28	17.30	0.00	0.00	100.01
10	120	51.36	0.49	2.07	0.00	11.60	0.41	15.32	18.52	0.23	0.00	100.00
11	121	51.54	0.54	1.58	0.00	13.17	0.46	14.73	17.71	0.29	0.00	100.02
12	131	51.54	0.59	1.89	0.00	11.88	0.51	14.68	18.60	0.30	0.00	99.99
13	133	52.04	0.48	1.25	0.00	12.24	0.37	15.59	17.79	0.24	0.00	100.00
14	100	51.37	0.52	1.72	0.02	11.39	0.38	15.41	18.25	0.30	0.00	99.36
15	103	51.40	0.45	1.78	0.01	11.47	0.39	15.83	17.98	0.26	0.00	99.59
16	104	51.29	0.48	1.80	0.01	11.11	0.38	15.83	18.10	0.31	0.00	99.31
17	114	51.01	0.41	1.63	0.01	12.75	0.45	15.71	16.89	0.26	0.00	99.11
18	116	51.30	0.40	1.64	0.02	11.34	0.40	16.24	17.81	0.27	0.01	99.41
19	118	50.61	0.60	1.86	0.02	13.00	0.48	15.08	17.32	0.36	0.00	99.32
20	119	51.06	0.53	1.71	0.00	12.42	0.46	15.58	17.41	0.29	0.00	99.45
21	126	51.27	0.55	2.17	0.00	11.28	0.36	15.25	18.11	0.36	0.00	99.35
22	135	51.10	0.44	1.57	0.06	12.69	0.46	15.37	17.18	0.34	0.00	99.19
23	136	51.35	0.47	2.41	0.10	10.21	0.35	16.04	18.59	0.32	0.00	99.83
24	137	51.50	0.46	1.58	0.00	11.89	0.45	15.89	17.30	0.26	0.00	99.33
25	143	50.99	0.55	2.84	0.02	10.26	0.30	14.97	18.88	0.33	0.00	99.13
26	145	50.73	0.56	2.49	0.02	10.57	0.32	15.51	18.68	0.39	0.00	99.28
27	147	50.92	0.48	2.62	0.01	10.08	0.30	15.73	18.70	0.38	0.01	99.22
28	148	50.61	0.53	2.65	0.03	10.58	0.33	15.64	18.64	0.30	0.00	99.30
29	164	51.22	0.50	1.92	0.00	11.71	0.41	15.39	17.85	0.26	0.02	99.29
30	166	51.19	0.42	1.62	0.02	11.50	0.41	15.38	18.30	0.32	0.02	99.18

Примечание. 1–13 – составы вкрапленников клинопироксена рядом с расплавленными включениями; 14–30 – составы вкрапленников клинопироксена, в которых расплавленные включения не изучались.

светлым и изменяются анизотропные кристаллические фазы. Начиная с 1030 °С идет явное плавление кристаллитов. Около 1140 °С самые мелкие (5–7 мкм) включения гомогенизируются в светлый расплав. Другие включения (10–20 мкм) становятся гомогенными в диапазоне 1165–1175 °С. В районе 1180–1190 °С микрзернистая основная масса (содержащая исследуемый вкрапленник) начинает проплаваться с развитием подвижного расплава, и мы вынуждены завершать опыт, закаливая систему резким отключением электронагревателя. После прогрева и закалки во включениях преобладает гомогенное стекло (рис. 9, б, в), часто содержащее флюидный пузырек (рис. 9, в).

**В плагиоклазе** первичные расплавленные включения (размерами 10–35 мкм) равномерно распреде-

лены по всему кристаллу. Часто множество включений как бы «пропитывает» центр вкрапленника и располагается по зонам роста минерала. Включения обладают отчетливой огранкой и содержат несколько коричневых и зеленоватых фаз, а также светлое стекло (обычно по краю включений) и газовый пузырек (рис. 9, г).

В ходе экспериментов в микротермокамере начиная с 820 °С содержимое включений темнеет и около 980 °С появляются первые порции светлого расплава. При 1100–1135 °С плавятся кристаллические фазы, и начиная с 1150 °С включения содержат светлый гомогенный расплав с небольшим флюидным пузырьком. При этих температурах начинает плавиться основная масса, содержащая вкрапленник плагиоклаза и большая часть крупных (более 25 мкм)



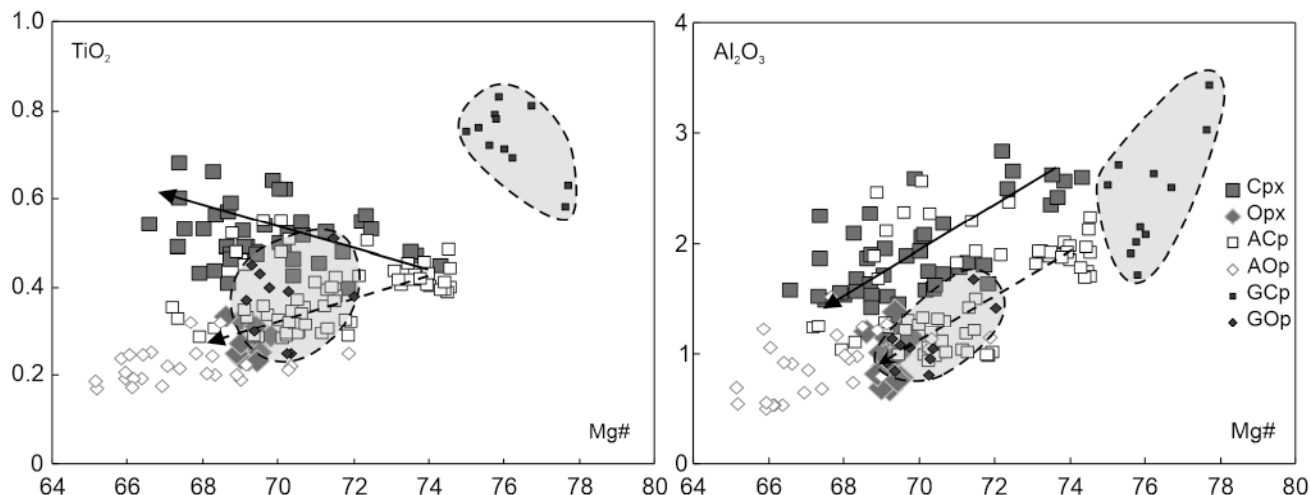


Рис. 7. Диаграммы  $TiO_2 - Mg\#$  и  $Al_2O_3 - Mg\#$  (мас. %) для вкрапленников пироксенов.

Клинопироксены: в базальтах (Cpx), андезитах (ACpx) острова Сулавеси (оригинальные данные) и в базальтовых породах (GCpx) вулкана Горелый (Камчатка) [8]. Ортопироксены в базальтах (Opx), андезитах (AOpx) острова Сулавеси (оригинальные данные) и в базальтовых породах (GOpx) вулкана Горелый [8]. Тренды изменения составов клинопироксенов из базальтов (сплошная линия) и из андезитов (пунктир) острова Сулавеси. Серым цветом обозначены данные по пироксенам из пород вулкана Горелый.

Таблица 4. Представительные анализы (мас. %) вкрапленников ортопироксена в базальтах острова Сулавеси.

№ п/п	№ анализа	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Сумма
1	94	52.68	0.24	0.68	0.00	19.18	0.61	24.21	1.94	0.08	0.00	99.61
2	95	52.72	0.27	0.88	0.00	19.24	0.64	24.13	1.98	0.00	0.00	99.86
3	96	52.47	0.29	1.14	0.04	18.53	0.60	24.05	2.07	0.00	0.00	99.19
4	97	52.51	0.24	0.69	0.03	19.31	0.65	24.13	1.97	0.09	0.01	99.61
5	98	52.64	0.27	1.39	0.00	18.81	0.56	23.90	2.27	0.06	0.01	99.90
6	102	52.61	0.25	0.82	0.02	19.45	0.68	24.19	2.02	0.01	0.00	100.03
7	117	52.52	0.27	1.00	0.08	19.26	0.61	24.06	2.00	0.04	0.00	99.84
8	123	52.35	0.25	0.78	0.00	19.01	0.58	24.34	2.21	0.05	0.01	99.58
9	124	53.01	0.23	0.76	0.00	19.14	0.58	24.42	2.08	0.12	0.00	100.33
10	125	52.35	0.33	1.18	0.01	19.15	0.59	23.97	2.20	0.00	0.00	99.76
11	127	52.64	0.33	1.20	0.00	19.24	0.56	23.62	2.17	0.04	0.01	99.82
12	165	52.56	0.31	1.00	0.00	18.96	0.62	24.17	2.33	0.00	0.00	99.95

включений обычно разгерметизируется, о чем свидетельствует увеличение плавающих в расплаве газовых пузырьков. В единичных включениях пузырьки продолжают уменьшаться и около 1180 °С могут наблюдаться полные гомогенизации в светлый расплав. После прогрева и закалки в сохранившихся включениях преобладает гомогенное стекло, содержащее флюидный пузырек (рис. 9, d, e).

Анализы гомогенных стекол прогретых и закаленных включений в минералах с помощью сканирующего микроскопа (табл. 6, 7) позволили выяснить особенности состава расплава, принимавшего участие в формировании базальтов острова Сулавеси.

На диаграмме  $(Na_2O+K_2O) - SiO_2$  все составы гомогенных стекол прогретых расплавных включений во вкрапленниках клинопироксена и плагиоклаза из базальтов вулкана Локон находятся в области пород нормальной щелочности. При этом они образуют достаточно компактную группу с вариациями  $SiO_2$  в диапазоне 52–56.5 мас.%, которая располагается в поле включений в пироксенах из базальтовых пород вулкана Горелый (Камчатка), а также перекрывается данными по стеклам негретых включений в оливине вулкана Сопутан. По этим данным включения в минералах из базальтов вулкана Локон кардинально отличаются от включений в клинопироксене и в плаги-

Таблица 5. Представительные анализы (мас. %) вкрапленников плагиоклаза в базальтах острова Сулавеси.

№ п/п	№ анализа	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Сумма
1	2	48.75	0.00	31.53	0.00	0.87	0.00	0.00	16.38	2.49	0.00	100.02
2	8	53.77	0.00	28.25	0.00	1.00	0.00	0.00	12.20	4.63	0.17	100.02
3	9	49.39	0.00	31.20	0.00	0.98	0.00	0.00	15.31	3.00	0.11	99.99
4	10	52.04	0.00	29.21	0.00	1.05	0.00	0.00	13.58	3.97	0.15	100.00
5	15	51.25	0.00	29.85	0.00	0.89	0.00	0.00	14.08	3.76	0.17	100.00
6	23	46.24	0.00	33.66	0.00	0.70	0.00	0.00	17.85	1.55	0.00	100.00
7	30	45.76	0.00	33.73	0.00	0.70	0.00	0.00	18.55	1.26	0.00	100.00
8	31	46.30	0.00	33.41	0.00	0.65	0.00	0.00	17.99	1.65	0.00	100.00
9	40	51.58	0.00	29.79	0.00	0.99	0.00	0.00	13.77	3.86	0.00	99.99
10	42	53.79	0.00	28.31	0.00	0.85	0.00	0.00	12.22	4.65	0.18	100.00
11	43	50.31	0.00	30.76	0.00	0.82	0.00	0.00	14.77	3.33	0.00	99.99
12	60	44.80	0.00	34.37	0.00	0.74	0.00	0.00	18.84	0.96	0.00	99.71
13	62	45.52	0.00	34.04	0.00	0.73	0.00	0.00	18.55	1.16	0.00	100.00
14	71	46.17	0.00	33.47	0.00	0.69	0.00	0.00	18.20	1.47	0.00	100.00
15	105	53.44	0.03	28.57	0.00	0.92	0.01	0.09	12.17	4.63	0.18	100.04
16	107	51.45	0.03	30.17	0.01	0.86	0.01	0.03	13.66	3.84	0.13	100.20
17	108	51.65	0.03	29.82	0.00	0.98	0.02	0.09	13.44	3.86	0.13	100.01
18	110	55.53	0.06	27.33	0.01	0.89	0.00	0.09	10.58	5.54	0.25	100.27
19	111	54.54	0.05	28.08	0.01	0.87	0.00	0.11	11.37	5.05	0.19	100.27
20	113	54.04	0.04	28.06	0.00	0.85	0.01	0.07	11.53	5.02	0.18	99.78
21	120	46.38	0.02	33.57	0.00	0.74	0.00	0.06	17.22	1.75	0.03	99.75
22	122	45.78	0.02	34.75	0.00	0.70	0.00	0.04	18.05	1.10	0.02	100.46
23	129	54.33	0.04	27.83	0.02	0.87	0.03	0.09	11.13	5.00	0.20	99.53
24	130	54.68	0.05	27.82	0.00	0.84	0.00	0.12	11.22	4.76	0.23	99.72
25	132	52.38	0.07	29.56	0.00	0.81	0.01	0.08	12.59	3.94	0.15	99.59
26	134	50.58	0.03	30.81	0.04	0.90	0.00	0.08	14.08	3.19	0.10	99.81
27	157	45.93	0.00	33.94	0.00	0.67	0.02	0.07	17.75	1.42	0.03	99.82
28	158	45.13	0.03	34.24	0.02	0.65	0.00	0.03	18.26	1.09	0.03	99.48
29	160	45.59	0.02	34.36	0.00	0.61	0.00	0.05	18.37	1.13	0.01	100.13
30	161	46.45	0.03	33.32	0.07	0.66	0.00	0.04	17.32	1.53	0.03	99.43

Примечание. 1–14 – составы вкрапленников плагиоклаза рядом с расплавленными включениями; 15–30 – составы вкрапленников плагиоклаза, в которых расплавленные включения не изучались.

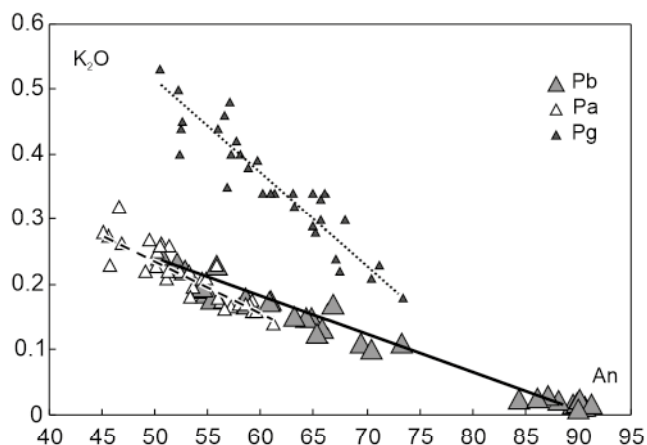
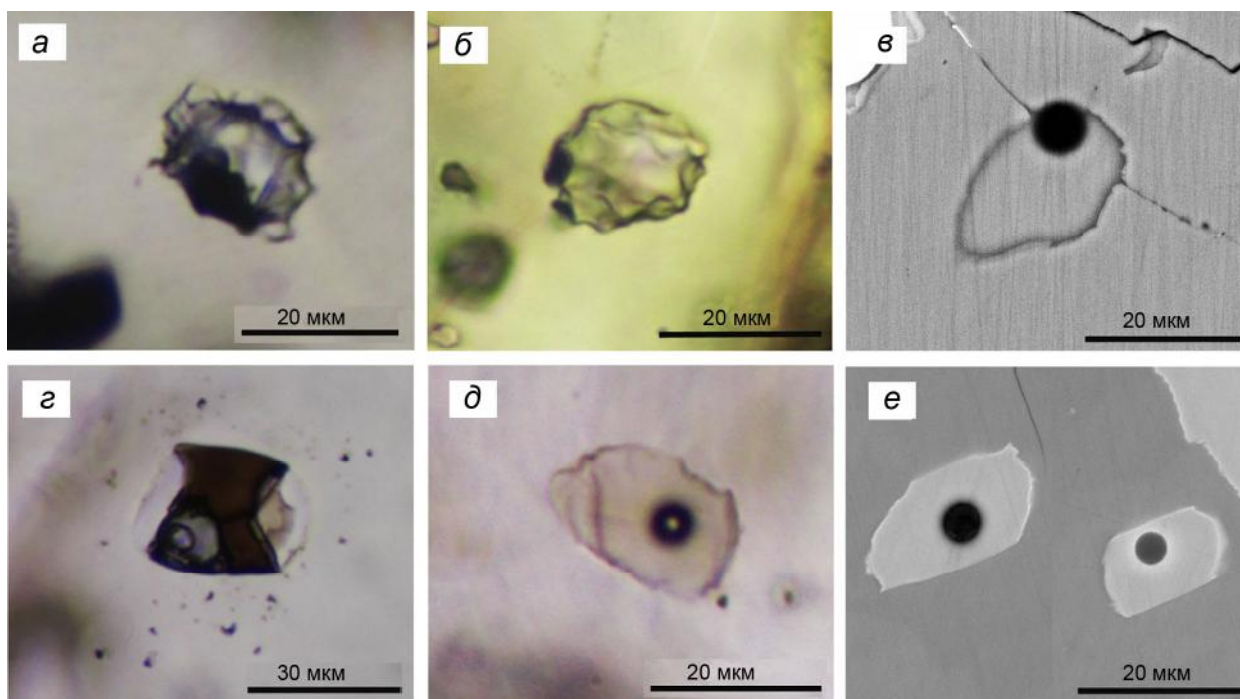


Рис. 8. Диаграмма K<sub>2</sub>O – An (мас.%) для вкрапленников плагиоклаза.

Вкрапленники плагиоклаза: в базальтах (Pb), в андезитах (Pa) острова Сулавеси (оригинальные данные) и в базальтовых породах вулкана Горелый на Камчатке (Pg) [8]. Тренды плагиоклазов из базальтов (сплошная линия), из андезитов (пунктир) и вулкана Горелый (точечная линия).



**Рис. 9.** Расплавные включения во вкрапленниках клинопироксена (*а, б, в*) и плагиоклаза (*г, д, е*) из базальта вулкана Локон.

*а, г* – негретые включения. Изображения в проходящем свете; *б, в, д, е* – прогретые включения, заполненные закалочным гомогенным стеклом; *б, д* – изображения в проходящем свете; *в, е* – изображения в отраженных электронах.

оклазе из андезитов кальдеры Тондоно, образующих тренды эволюции составов от 59 до 80 мас.%  $\text{SiO}_2$  (рис. 10).

По соотношению  $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$  большинство данных по стеклам включений в клинопироксене и в плагиоклазе из базальтов вулкана Локон образуют компактную группу с  $\text{K}_2\text{O}$  до 1.5 мас.% (в отличие от включений в минералах из андезитов с широкими вариациями  $\text{K}_2\text{O}$  и  $\text{SiO}_2$ ), располагающуюся в поле включений в пироксенах из базальтовых пород вулкана Горелый (Камчатка), и относятся к сериям с умеренной калиевостью.

Согласно отношениям  $\text{CaO} - \text{MgO}$  стекла включений в клинопироксене и в плагиоклазе из базальтов вулкана Локон также формируют одну компактную группу. При этом включения в клинопироксене из базальта вулкана Локон, частично перекрываясь с данными по стекловатым включениям в оливине соседнего вулкана Сопутан, обладают максимальными содержаниями магния и располагаются в начале тренда эволюции расплавов формировавших андезиты кальдеры Тондоно.

Основные закономерности составов стекол расплавных включений в минералах базальтов вулкана Локон хорошо видны на вариационных диаграммах,

показывающих распределение петрохимических данных в зависимости от количества  $\text{SiO}_2$  (рис. 11). По соотношению большинства компонентов ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ) с  $\text{SiO}_2$  изученные включения в клинопироксене и в плагиоклазе образуют практически одну компактную группу (с относительно максимальными содержаниями титана, железа, магния и кальция при минимальном количестве кремнезема), перекрывающуюся полем стекол негретых гомогенных включений в оливине вулкана Сопутан. Фактически от этой группировки идет эволюция расплавов (формировавших андезиты кальдеры Тондоно), фиксируемая трендами составов расплавных включений в клинопироксене андезитов с падением содержаний компонентов ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ) при накоплении  $\text{SiO}_2$ . Для алюминия и натрия наблюдается иная ситуация с одновременным ростом содержаний этих компонентов и кремнезема, с образованием как бы единого тренда включений в клинопироксене в базальте и в андезите (рис. 11).

Следует отметить, что на всех вариационных диаграммах составы расплавных включений в плагиоклазе из базальтов вулкана Локон близки к данным по включениям в плагиоклазе из базальтовых пород вулкана Горелый, полученным другими исследователями

Таблица 6. Представительные анализы (мас. %) гомогенных стекол прогретых расплавных включений в клинопироксене из базальта острова Сулавеси.

№ п/п	№ анализа	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Сумма
1	72	54.37	1.08	10.98	12.74	0.33	5.53	9.06	2.86	0.96	0.00	97.91
2	73	53.52	1.11	8.71	12.81	0.46	7.39	10.91	1.89	0.85	0.35	98.00
3	74	54.58	1.13	11.24	11.71	0.24	5.62	9.23	2.85	1.02	0.25	97.87
4	75	54.17	1.19	10.98	13.21	0.39	5.26	9.02	2.74	1.04	0.00	98.00
5	76	54.18	1.14	8.47	12.82	0.36	7.06	11.03	2.01	0.92	0.00	97.99
6	77	54.38	0.94	8.16	12.44	0.34	7.75	11.19	1.88	0.82	0.00	97.90
7	78	54.08	1.07	8.19	12.65	0.45	7.50	11.21	2.02	0.83	0.00	98.00
8	82	54.75	1.05	8.03	13.34	0.38	7.38	10.56	1.70	0.82	0.00	98.01
9	83	54.66	0.95	7.96	13.03	0.35	7.73	10.60	1.67	0.86	0.00	97.81
10	84	54.70	0.98	8.25	13.06	0.33	7.61	10.52	1.71	0.83	0.00	97.99
11	88	55.88	1.08	10.72	11.82	0.31	5.34	8.47	2.96	1.18	0.23	97.99
12	89	56.13	1.17	10.64	11.90	0.28	5.31	8.57	2.85	1.15	0.00	98.00
13	94	56.07	1.37	8.71	12.07	0.00	7.01	9.47	2.22	0.89	0.00	97.81
14	95	55.97	1.40	8.46	11.90	0.21	7.13	9.84	2.22	0.87	0.00	98.00
15	98	53.32	1.08	9.09	13.54	0.32	7.42	10.07	2.23	0.83	0.00	97.90
16	99	53.38	1.15	9.62	13.15	0.42	7.11	9.83	2.34	0.89	0.00	97.89
17	100	56.75	0.97	8.93	11.38	0.31	6.44	9.15	2.90	0.87	0.30	98.00
18	114	53.18	0.84	9.31	13.59	0.30	6.99	10.81	2.25	0.48	0.25	98.00
19	115	56.04	1.01	10.46	10.62	0.24	5.72	9.34	3.00	1.18	0.30	97.91
20	116	56.16	0.88	8.70	12.44	0.39	6.03	9.63	2.53	1.00	0.25	98.01
21	117	52.77	1.06	9.20	14.95	0.33	6.75	10.68	1.64	0.62	0.00	98.00
22	118	55.97	1.03	9.68	13.65	0.35	5.18	8.35	2.83	0.97	0.00	98.01
23	119	52.62	0.84	9.05	15.60	0.40	6.67	10.20	1.60	1.03	0.00	98.01
24	122	52.70	0.85	12.00	8.68	0.26	7.81	12.43	2.60	0.68	0.00	98.01
25	123	53.98	0.81	12.41	8.69	0.20	8.04	12.57	2.66	0.63	0.00	99.99
26	124	56.59	1.48	7.61	11.65	0.31	6.72	9.32	3.05	1.27	0.00	98.00
27	126	56.31	0.88	8.68	11.37	0.27	6.74	9.37	2.93	1.18	0.26	97.99
28	127	55.68	0.83	8.41	12.22	0.27	7.41	8.92	2.76	1.16	0.34	98.00
29	129	56.73	0.91	8.59	11.03	0.23	7.41	8.83	2.79	1.47	0.00	97.99

[11], что подтверждает достоверность нашей информации.

#### УСЛОВИЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ МИНЕРАЛОВ В БАЗАЛЬТАХ ОСТРОВА СУЛАВЕСИ

Условия кристаллизации вкрапленников клинопироксена и плагиоклаза в базальтах острова Сулавеси выяснены на основе совместного использования данных по составам минералов и находящихся в них расплавных включений. Температурный режим был оценен также с помощью экспериментов в микротермокамере по гомогенизации включений.

Для определения *PT*-параметров образования вкрапленников клинопироксена в базальтах острова Сулавеси применена программа WinPLtb, основанная на соотношениях составов пироксена и расплава, из которого он кристаллизуется (Clinopyroxene-Liquid Thermobarometry) [37]. При расчетах нами были ис-

пользованы хорошо известные и апробированные на других объектах барометры и термометры [28, 32], входящие в состав программы WinPLtb. Информация по химическому составу расплава получена в ходе анализа гомогенных стекол прогретых включений в клинопироксене. Содержания воды в расплаве были оценены в результате сравнения данных по рассмотренным нами базальтам вулкана Локон и по базальтам расположенного рядом (с другой стороны кальдеры Тондоно) вулкана Сопутан. Для последнего исследования стекловатых включений в оливине [25] показали среднее содержание воды в базальтовых расплавах около 2.58 мас. %. Учитывая сходство химических составов базальтов (рис. 3, 4), оливинов (рис. 6) и стекол расплавных включений (рис. 10, 11) обоих вулканов, использование этих данных по количеству H<sub>2</sub>O для расплавов вулкана Локон вполне обосновано.

Таблица 7. Представительные анализы гомогенных стекол прогретых расплавных включений в плагиоклазе из базальта острова Сулавеси.

№ п/п	№ анализа	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Сумма
1	1	54.26	1.20	16.30	10.18	0.32	3.59	10.12	2.88	0.87	0.26	99.98
2	4	53.71	0.90	17.88	10.33	0.28	2.37	8.85	3.89	1.36	0.28	99.85
3	5	55.08	0.89	17.86	9.89	0.00	2.33	8.73	3.86	1.22	0.00	99.86
4	7	54.32	1.01	17.96	10.17	0.00	2.29	8.96	3.96	1.20	0.00	99.87
5	11	52.87	1.10	15.61	10.55	0.25	4.99	8.63	2.75	0.83	0.42	98.00
6	13	53.10	1.17	17.89	10.79	0.27	2.48	9.08	3.51	1.32	0.25	99.86
7	14	53.21	1.14	17.96	10.64	0.25	2.53	8.90	3.59	1.30	0.34	99.86
8	17	53.32	1.12	14.80	11.09	0.23	5.49	9.69	3.55	0.71	0.00	100.00
9	19	53.46	1.20	15.30	10.20	0.32	4.74	9.79	3.78	0.82	0.40	100.01
10	21	52.45	1.13	15.66	10.81	0.30	5.28	9.82	3.76	0.79	0.00	100.00
11	22	52.13	1.19	15.43	11.21	0.22	5.29	9.72	3.70	0.75	0.26	99.90
12	29	52.33	1.07	17.57	8.87	0.21	4.75	10.75	3.76	0.70	0.00	100.01
13	33	52.84	0.89	16.65	10.76	0.00	4.24	9.81	3.60	0.97	0.00	99.76
14	34	52.52	0.99	16.32	11.07	0.24	4.11	10.00	3.67	0.98	0.00	99.90
15	39	55.63	1.23	16.82	9.45	0.28	2.65	8.51	4.10	1.07	0.26	100.00
16	44	51.75	0.96	16.55	10.60	0.20	5.52	10.02	3.68	0.72	0.00	100.00
17	45	51.59	0.99	16.34	10.57	0.24	5.57	10.09	3.58	0.69	0.35	100.01
18	47	51.78	0.89	16.71	10.15	0.00	5.71	10.13	3.74	0.67	0.00	99.78
19	48	51.64	0.99	16.20	10.23	0.25	5.80	10.44	3.72	0.63	0.00	99.90
20	49	52.03	0.91	16.35	9.96	0.25	5.51	10.10	3.93	0.68	0.00	99.72
21	51	51.45	1.08	16.11	10.34	0.21	5.95	10.12	3.79	0.70	0.00	99.75
22	52	52.01	0.84	16.43	10.08	0.00	5.74	10.16	3.75	0.67	0.00	99.68
23	54	52.21	0.95	16.35	9.85	0.22	5.44	10.04	4.29	0.65	0.00	100.00
24	55	52.15	0.90	16.53	9.64	0.22	5.48	10.10	4.33	0.64	0.00	99.99
25	57	51.72	0.94	16.73	9.58	0.25	5.34	10.14	4.26	0.75	0.00	99.71
26	59	51.69	0.89	16.45	10.01	0.31	5.39	9.95	4.09	0.78	0.00	99.56
27	63	52.26	0.95	15.84	10.67	0.00	5.73	10.11	3.52	0.65	0.28	100.01
28	65	52.60	0.97	16.13	10.22	0.26	5.46	9.82	3.80	0.73	0.00	99.99
29	66	52.27	0.99	15.77	10.64	0.24	5.51	10.02	3.67	0.61	0.00	99.72
30	69	52.85	1.03	15.97	10.12	0.25	5.27	10.19	3.66	0.65	0.00	99.99

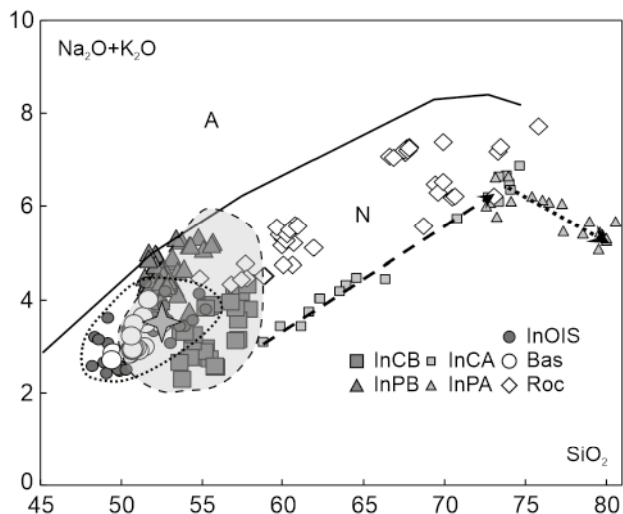
Глубины кристаллизации клинопироксенов определены на основе давлений, установленных с помощью программы [37]. При этом использовались характеристики для базальтов, плотность которых, согласно справочным данным составляет около 3 г/см<sup>3</sup>. Глубины образования клинопироксенов были оценены также напрямую по программе [37] с использованием плотностно-глубинных моделей для островодужного магматизма [19].

В целом установлены достаточно широкие интервалы давлений (5.7–1.8 кбар) и температур (1150–1105 °С). Эти температуры частично перекрываются с экспериментальными температурами гомогенизации включений в клинопироксене (1140–1175 °С).

Выделяются два уровня глубин кристаллизации клинопироксена в базальтах вулкана Локон: 20.6–14.5 км (1150–1130 °С) и 13–6 км (1145–1105 °С).

Близкие параметры установлены и для клинопироксена из андезитов кальдеры Тондоно [9], хотя отдельные вкрапленники пироксена из андезитов могли кристаллизоваться и на больших (до 22 км) глубинах. При этом образование части андезитовых клинопироксенов происходило в промежуточных очагах при постоянных давлениях в ходе заметного падения температур (до 970 °С) в отличие от клинопироксена в базальтах, образующегося при незначительном снижении температуры в процессах подъема расплава из нижнего очага в верхний (рис. 12).

На основе данных по составам плагиоклазов и находящихся в них расплавных включений были рассчитаны по программе [33] температуры кристаллизации вкрапленников плагиоклаза в базальтах вулкана Локон. Как и в случае расчетов по клинопироксенам использовались средние содержания воды в базальто-



**Рис. 10** Диаграмма  $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}) - \text{SiO}_2$  (мас.%) для гомогенных стекол расплавных включений в минералах из базальтов вулкана Локон.

Стекла прогретых включений в клинопироксене (InCB) и в плагиоклазе (InPB) из базальтов вулкана Локон. Стекла прогретых включений в клинопироксене (InCA) и в плагиоклазе (InPA) из андезитов кальдеры Тондоно. Стекла негретых гомогенных включений в оливине (InOIS и поле обозначенное точечной линией) вулкана Сопутан (использованы аналитические данные из работы [25]). Тренды включений в клинопироксене (пунктир) и в плагиоклазе (точечный) из андезитов. Базальтовые (Bas) и другие эффузивные (Roc) породы северо-востока острова Сулавеси (использованы аналитические данные авторов и из работ [20, 26, 30]. Области – щелочных (A) и нормальных (N) пород. Сплошная линия – граница между сериями пород (по [6] с изменениями). Серое поле – данные по включениям в пироксенах из базальтовых пород вулкана Горелый (Камчатка) [8]. Звезда – состав детально изученного образца базальта острова Сулавеси. Составы пород и стекол расплавных включений пересчитаны на 100 %.

вых магмах соседнего вулкана Сопутан – 2.58 %. В результате выяснено, что кристаллизация плагиоклазовых вкрапленников в базальтах острова Сулавеси происходила в интервале температур 1160–1120 °С, практически совпадающим с данными по клинопироксену. При этом расчетные параметры заметно ниже температур гомогенизации некоторых включений (до 1180 °С) в плагиоклазе из базальта вулкана Локон.

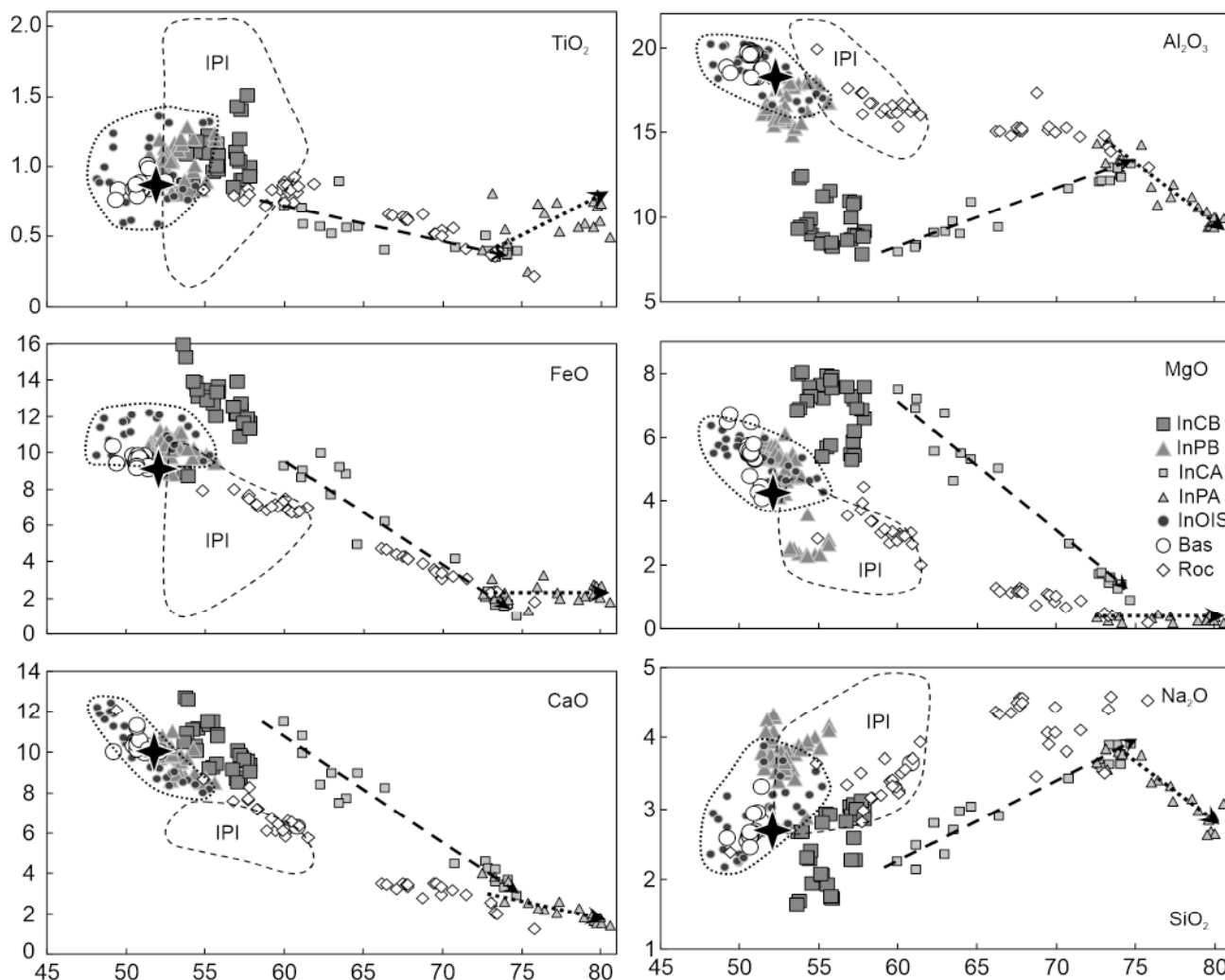
#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Всесторонние (петролого-геохимические, минералогические и термобарогеохимические) исследования и сравнительный анализ с эталонными островодужными эффузивными комплексами позволили получить новые данные об условиях образования базальтов острова Сулавеси, Тихий океан. Большое значения для расшифровки параметров петрогенети-

ческих процессов имеют результаты изучения вкрапленников минералов и находящихся в них расплавных включений.

Детальные исследования составов вкрапленников клинопироксена и плагиоклаза в базальтах острова Сулавеси показали, что в их кристаллизации участвовали два типа расплавов. Из наиболее «примитивного» (собственно «базальтового») расплава образуются плагиоклазы с высокими значениями анортитового компонента (битовнит-анортит), отсутствующие в андезитах этого острова. Другой (более «продвинутой») расплав ответственен за кристаллизацию однопородных для базальта и андезита клинопироксенов и плагиоклазов. Данные по клинопироксенам в свою очередь показывают, что при формировании андезитов острова Сулавеси участвовали также два расплава. Один расплав ответственен за кристаллизацию клинопироксенов, имеющих одинаковый состав с минералами из базальта. При этом значительная часть клинопироксенов в андезитах обладает другими, по сравнению с пироксенами из базальтов, составами, и, соответственно, кристаллизовалась из особого («андезитового») расплава.

Анализ составов гомогенных стекол прогретых расплавных включений в минералах из базальтов вулкана Локон свидетельствует о принципиальном их сходстве с характеристиками базальтовых магматических систем других вулканов (в частности вулканов Сопутан на острове Сулавеси и Горелый на Камчатке), установленными также с помощью изучения включений. В то же время, данные по содержанию некоторых химических элементов могут вызвать вопросы. Особенно это касается алюминия во включениях в плагиоклазе из базальта вулкана Локон, так как можно предположить, что заметные (до 14.8–18 мас. %) количества этого компонента могут быть связаны с поступлением из минерала-хозяина в результате методических особенностей проведения нами высокотемпературных опытов. На рис. 11 видно, что относительно высокие содержания  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в стеклах включений в плагиоклазе устанавливаются и другими исследователями, применявшими другие методы высокотемпературных экспериментов с включениями [11]. Подобные количества алюминия (до 16–19.3 мас. %) в стеклах включений в плагиоклазе установлены также для эффузивов целого ряда вулканов Камчатки: Толбачик, Ичинский, Уксичан, Горелый [2, 3, 8]. При этом весьма высокие содержания  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (16.6 мас. %) определены для негретых полностью стекловатых включений в плагиоклазе вулкана Толбачик [2]. Дополнительным свидетельством реальности относительно повышенных содержаний алюминия в расплавах вулкана Локон являются данные по составам негретых стекло-



**Рис. 11.** Вариационные диаграммы (мас.%) для гомогенных стекол расплавных включений в минералах из базальтов вулкана Локон.

IPI – поле составов гомогенных стекол включений в плагиоклазе из базальтовых пород вулкана Горелый, Камчатка (использованы аналитические данные из работы [11]). Составы пород и стекол расплавных включений пересчитаны на 100%. Остальные условные обозначения см. на рис. 10.

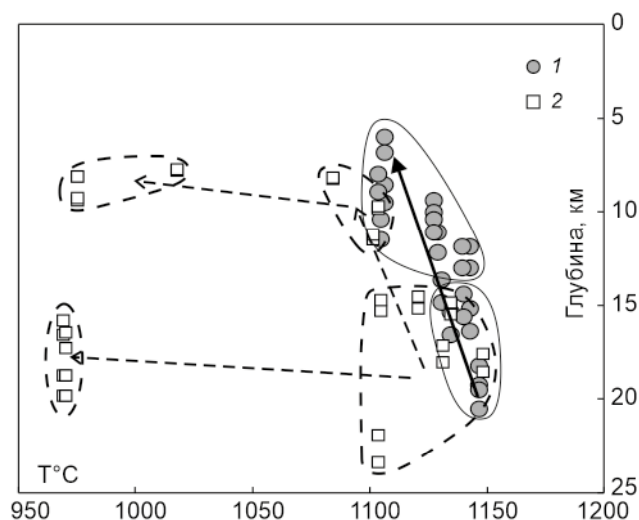
ватых включений в оливине располагающегося рядом (и входящего в единую магматическую систему кальдеры Тондоно и вулканов Локон и Сопутан) вулкана Сопутан – 16.3–20 мас. %  $Al_2O_3$  [25].

В целом, составы гомогенных стекол расплавных включений, приведенные в частности на вариационных диаграммах (рис. 11), свидетельствуют о кардинальных различиях магматических систем, участвовавших при формировании базальтов и андезитов в ходе развития взаимосвязанных структур кальдеры Тондоно и вулканов Локон и Сопутан.

Прежде всего, включения в минералах показывают тесную связь базальтового магматизма вулканов Локон и Сопутан, для которых в общем характерны примитивные (минимум  $SiO_2$  48.2–51.5 мас. % и мак-

симум MgO до 8 мас. %) расплавы, выдержанные по содержанию других химических элементов. Составы расплавов, формирующих в случае большинства компонентов компактные группы, располагаются на вариационных диаграммах в начале трендов развития андезитовых магматических систем (рис. 11). Таким образом, эти расплавы могли быть исходными для развития всей магматической системы, сформировавшей структуры кальдеры Тондоно и вулканов Локон и Сопутан.

Как хорошо видно на рис. 12, демонстрирующем процессы кристаллизации вкрапленников клинопироксена на различных глубинных уровнях, две промежуточные очаги формирования пироксенов из базальтов практически сливаются, образуя фактически



**Рис. 12.** Условия кристаллизации вкрапленников клинопироксена в базальтах вулкана Локон.

Клинопироксены из базальтов вулкана Локон (1) и из андезитов кальдеры Тондоно (2).

единую магматическую колонну (зону кристаллизации) на глубинах 20.6–6 км с незначительным понижением температуры: 1150–1110 °С. Эти факты говорят об относительно быстром подъеме базальтовой магмы с глубин ее генерации и при ее кристаллизации без задержек в промежуточных очагах, что способствовало сохранению первичных составов глубинных расплавов. При этом магмы, ответственные за формирование андезитов, задерживались в промежуточных очагах со значительным падением температуры при относительно постоянном давлении в системе, что способствовало процессам фракционирования.

В целом, исследования расплавных включений позволили выявить не только четкие различия процессов генезиса базальтов и андезитов (постоянство составов расплавов и незначительное падение температур при непрерывном подъеме магмы – для базальтов, и фракционирование при значительном падении температуры в глубинных промежуточных очагах – для андезитов), но и дали возможность рассмотреть параметры генерации исходных для этих магматических комплексов расплавов. Основой для расчетов послужили установленные нами данные о том, что базальты острова Сулавеси формировались в ходе кристаллизации устойчивых по своему составу, достаточно «примитивных» (стекла включений во вкрапленниках клинопироксена и плагиоклаза вулкана Локон и стекла включений в оливине вулкана Сопутан, рис. 11) расплавов, которые относительно быстро поднимались с глубин их генерации без значительных задержек в промежуточных очагах. Использование

данных по составам этих «примитивных» расплавов совместно с сейсмотомографической информацией дало возможность оценить глубины генерации первичных расплавов, ответственных за формирование базальтов острова Сулавеси [4].

В результате расчетного моделирования было выяснено, что первичные мантийные расплавы вулкана Сопутан формировались на двух уровнях: 100–90 км (1550–1510 °С) и 80–60 км (1470–1415 °С). На сейсмотомографических разрезах эти интервалы располагаются на границах зон с интенсивными гипоцентрами землетрясений. Верхняя область магмогенерации находится в начале развития наиболее интенсивно разогретых корней вулкана Сопутан [4].

### ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Анализ составов вкрапленников клинопироксена и плагиоклаза в базальтах острова Сулавеси показал, что в их кристаллизации участвовали два типа расплавов. Из наиболее «примитивного» расплава образуются плагиоклазы с высокими значениями анортитового компонента, отсутствующие в андезитах этого острова. Другой расплав ответственен за кристаллизацию однотипных для базальта и андезита клинопироксенов и плагиоклазов.

2. Изучение гомогенных стекол расплавных включений в минералах из базальтов вулкана Локон свидетельствует о сходстве характеристик базальтовых магматических систем разных островодужных комплексов Тихого океана. В частности, включения показывают тесную связь базальтового магматизма вулканов Локон и Сопутан, для которых характерны «примитивные» ( $\text{SiO}_2$  48.2–51.5 мас. % и MgO до 8 мас. %) расплавы, выдержанные по содержанию других химических элементов и располагающиеся на вариационных диаграммах в начале «андезитовых» трендов. Соответственно, эти расплавы могут быть близки к исходным для развития всей магматической системы, сформировавшей взаимосвязанные структуры кальдеры Тондоно и вулканов Локон и Сопутан.

3. На основе совместного применения данных по составам расплавных включений и минералов-хозяинов установлены два уровня глубин кристаллизации клинопироксена (20.6–14.5 км, 1150–1130 °С и 13–6 км, 1145–1105 °С) и температуры образования плагиоклаза (1160–1120 °С) в базальтах вулкана Локон.

4. В целом, результаты исследования включений и минералов свидетельствуют о принципиальных различиях *PTX* – параметров магматических систем, формировавших базальты и андезиты острова Сулавеси. Клинопироксен в базальтах образовывался из выдержанных по составу расплавов в ходе незначительного уменьшения температур при непрерывном и существ-



венном падении давления в процессах подъема магмы. Кристаллизация минералов в андезитах происходила по другой схеме – с задержками при постоянных давлениях в глубинных промежуточных очагах и существенном падении температуры, что способствовало процессам фракционирования и эволюции расплавов.

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

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриева Н.В., Симонов В.А., Сафонова И.Ю., Котляров А.В. Геохимические особенности эффузивных комплексов острова Сулавеси, (Индонезия) // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту). Иркутск: Ин-т земной коры СО РАН, 2022. Вып. 20. С. 80–82.
2. Добрецов Н.Л., Симонов В.А., Котляров А.В., Кулаков Р.И., Карманов Н.С. Физико-химические параметры кристаллизации расплавов в промежуточных надсубдукционных камерах (на примере вулканов Толбачинский и Ичинский, Камчатка) // Геология и геофизика. 2016. Т. 57, № 7. С. 1265–1291. <http://dx.doi.org/10.15372/GiG20160701>
3. Добрецов Н.Л., Симонов В.А., Котляров А.В., Карманов Н.С. Физико-химические параметры магматизма вулканов Уксичан и Ичинский (Срединный хребет Камчатки): данные по расплавленным включениям. // Геология и геофизика. 2019. Т. 60, № 10. С. 1353–1383. <https://doi.org/10.15372/GiG2019100>
4. Котляров А.В., Яковлев А.В., Дмитриева Н.В., Сафонова И.Ю., Симонов В.А. Условия генерации глубинных магм в районе острова Сулавеси, Индонезия (данные по сейсмо-томографии и термобарогеохимии) // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Иркутск: Ин-т земной коры СО РАН, 2022. Вып. 20. С. 147–148.
5. Лаврентьев Ю.Г., Королюк В.Н., Усова Л.В., Нигматулина Е.Н. Рентгеноспектральный микроанализ породообразующих минералов на микроанализаторе JXA-8100 // Геология и геофизика. 2015. Т. 56, № 10. С. 1813–1824. <http://dx.doi.org/10.15372/GiG20151005>
6. Петрографический кодекс России. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2009. 200 с.
7. Симонов В.А. Петрогенезис офиолитов (термобарогеохимические исследования). Новосибирск: ОИГГМ СО РАН, 1993. 247 с.
8. Симонов В.А., Добрецов Н.Л., Котляров А.В., Карманов Н.С., Боровиков А.А. Особенности кристаллизации минералов на разных стадиях развития магматизма вулкана Горелый (Камчатка): данные по расплавленным и флюидным включениям // Геология и геофизика. 2021. Т. 62, № 1. С. 103–133. <https://doi.org/10.15372/GiG2020164>
9. Симонов В.А., Дмитриева Н.В., Сафонова И.Ю., Котляров А.В., Карманов Н.С. Условия формирования андезитов острова Сулавеси (Индонезия) – данные по расплавленным включениям: XIX Всерос. конф. по термобарогеохимии, посвященная памяти И.Т. Бакуменко. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2022. С. 89–90.
10. Соболев А.В., Слуцкий А.Б. Состав и условия кристаллизации исходного расплава сибирских мейменитов в связи с общей проблемой ультраосновных магм // Геология геофизика. 1984. Т. 12. С. 97–110.
11. Толстых М.Л., Наумов В.Б., Гавриленко М.Г., Озеров А.Ю., Кононкова Н.Н. Химический состав, летучие компоненты и элементы примеси расплавов вулканического центра Горелый (Южная Камчатка) по данным изучения включений в минералах // Геохимия. 2012. № 6. С. 576–606.
12. Шараськин А.Я. Тектоника и магматизм окраинных морей в связи с проблемами эволюции коры и мантии. М.: Наука, 1992. 163 с.
13. Advokaat E.L., Hall R., White L.T., Watkinson I.M., Rudyanawan A., BouDagher-Fadel K. Miocene to recent extension in NW Sulawesi, Indonesia // J. Asian Earth Sci. 2017. V. 147. P. 378–401. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jseae.2017.07.023>
14. Arculus R.J., Pearce J.A., Murton B.J., Van der Laan S.R. Igneous stratigraphy and major-element geochemistry of holes 786a and 786b // Proc. ODP, Sci. Results. 1992. V. 125. P. 143–169.
15. Badan Geologi. Data dasar gunung api Indonesia. Second ed. Bandung: Ministry of Energy and Mineral Resources Republic of Indonesia, 2011.
16. Bergman S.C., Coffield D.Q., Talbot J.P., Garrard R.J. Tertiary tectonic and magmatic evolution of Western Sulawesi and the Makassar Strait, Indonesia: evidence for a Miocene continent–continent collision. Tectonic evolution of SE Asia // Geol.Soc. London, Spec. Publ., 1996. V. 106. P. 391–430.
17. Boynton W.V. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. Rare earth element geochemistry / P. Henderson (ed.). Oxford-Amsterdam: Elsevier, 1984. P. 63–114.
18. Daly M.C., Cooper M.A., Wilson I., Svith D.G., Hooper B.G.D. Cenozoic plate tectonics and basin evolution in Indonesia // Marine and Petrol. Geol. 1991. V. 8. P. 2–21.
19. DeBari S.M., Greene A.R. Vertical stratification of composition, density, and inferred magmatic processes in exposed arc crustal sections. In: Arc-continent collision. Frontiers in Earth Sciences. Berlin: Springer-Verlag, 2011. P. 121–144. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-88558-0\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-540-88558-0_5)
20. Elburg M., Foden J. Temporal changes in arc magma geochemistry, northern Sulawesi, Indonesia // Earth Planet. Sci. Lett. 1998. V. 163. P. 381–398.
21. Gavrilenko M., Ozerov A., Kyle P.R., Carr M.J., Nikulin A., Vidito C., Danyushevsky L. Abrupt transition from fractional crystallization to magma mixing at Gorely volcano (Kamchatka) after caldera collapse // Bull. Volcanology. 2016. V. 78 (7). P. 1–28. <https://doi.org/10.1007/s00445-016-1038-z>
22. Hall R. Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: computer-based reconstructions, model and animations // J. Asian Earth Sci. 2002. V. 20. P. 353–431.
23. Hanyu T., Gill J., Tatsumi Y., Kimuru J-I., Sato K., Chang Q., Senda R., Miyazaki T., Hirahara Y., Takanashi T., Zulkarnain I. Across- and along-arc geochemical variations of lava chemistry in the Sangihe arc: Various fluid and melt slab fluxes in response to slab temperature // Geochem. Geophys. Geosystems. 2012. V. 13 (10). Q10021. doi:10.1029/2012GC004346
24. Jaya A., Nishikawa O., Hayasaka Ya. LA-ICP-MS zircon U-Pb and muscovite K-Ar ages of basement rocks from the south arm of Sulawesi, Indonesia // Lithos. 2017. V. 292–293. P. 96–110. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.08.023>
25. Kunrat S.L. Sopotan Volcano, Indonesia: Petrological

- systematics of volatiles and magmas and their bearing on explosive eruptions of a basalt volcano: Dissertations and Theses. 2017. Paper 3828. 119 p. <https://doi.org/10.15760/etd.5722>
26. Kushendratno, Pallister J.S., Kristianto, Bina F.R., McCausland W., Carn S., Haerani N., Griswold J., Keeler, R. Recent explosive eruptions and volcano hazards at Sopotan volcano – a basalt stratovolcano in north Sulawesi, Indonesia // *Bull. Volcanology*. 2012. V. 74 (7). P. 1581–1609.
  27. Macpherson C.G., Forde E.J., Hall R., Thirlwall M.F. Geochemical evolution of magmatism in an arc – arc collision: the Halmahera and Sangihe arcs, eastern Indonesia // *Geol. Soc. London Spec. Publ.* 2003. V. 219. P. 207–220. DOI: 10.1144/GSL.SP.2003.219.01.10
  28. Masotta M., Mollo S., Freda C., Gaeta M., Moore G. Clinopyroxene-liquid thermometers and barometers specific to alkaline differentiated magmas // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2013. N 166. P. 1545–1561.
  29. Maulana A., Imai A., Van Leeuwen Th., Watanabe K., Yonezu K., Nakano T., Boyce A., Page L., Schersten A. Origin and geodynamic setting of Late Cenozoic granitoids in Sulawesi, Indonesia // *J. Asian Earth Sci.* 2016. V. 124. P. 102–125. <http://dx.doi.org/10.17014/ijog.3.2.139-147>
  30. Morrice M.G., Jezek P.A., Gill J.B., Whitford D.J. An introduction to the Sangihe arc: volcanism accompanying arc – arc collision in the Molucca sea, Indonesia // *J. Volcanology and Geothermal Research*. 1983. V. 19. P. 135–165.
  31. Murton B.J., Peate D.W., Arculus R.J., Pearce J.A., Van der Laan S.R. Trace-element geochemistry of volcanic rocks from site 786: the Izu-Bonin forearc // *Proc. ODP. Sci. Results*. 1992. V. 125. P. 211–235.
  32. Putirka K., Ryerson F.J., Mikaelian H. New igneous thermobarometers for mafic and evolved lava compositions, based on clinopyroxene + liquid equilibria // *Am Miner.* 2003. V. 88. P. 1542–1554.
  33. Putirka K.D. Thermometers and barometers for volcanic systems // *Rev. Mineral. Geochem.* 2008. V. 69 (1). P. 61–120. <https://doi.org/10.2138/rmg.2008.69.3>
  34. Sobolev A.V., Danyushevsky L.V. 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.* 1994. V. 35. P. 1183–1211.
  35. Tatsumi Y., Murasaki M., Arsadi E.M., Nohda S. Geochemistry of Quaternary lavas from NE Sulawesi: transfer of subduction components into mantle wedge // *Contrib. to Mineral. and Petrol.* 1991. V. 107. P. 137–149.
  36. VMap0 <https://gis-lab.info/>
  37. Yavuz F., Yıldırım D.K. A Windows program for pyroxene-liquid thermobarometry // *Periodico di Mineralogia*. 2018. V. 87 (2). P. 149–172. <http://dx.doi.org/10.2451/2018PM787>
  38. Zhang X.R., Huang T.-N., Chung S.-L., Maulana A., Mawaleda M., Tien C.-Y., Lee H.-Y., Liu P.-P. Late Eocene subduction initiation of the Indian Ocean in the North Sulawesi Arc, Indonesia, induced by abrupt Australian plate acceleration // *Lithos*. 2022. V. 422–423. P. 106742. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2022.106742>

Рекомендована к печати А.Н. Диденко

после доработки 23.12.2022 г.

принята к печати 23.01.2023 г.

*N.V. Dmitrieva, V.A. Simonov, I.Yu. Safonova, A.V. Kotlyarov, N.S. Karmanov*

### **Physicochemical conditions for the formation of recent basalts of Lokon Volcano, Sulawesi Island in the Pacific Ocean: melt inclusion data**

We studied phenocrysts and melt inclusions in order to evaluate physical and chemical conditions of petrogenesis of the Sulawesi Island (southwestern Pacific) basalts. The compositions of the phenocrysts of clinopyroxene and plagioclase hosted by basalts of the Lokon volcano indicate two types of melts: primitive and differentiated. Primitive magmas produced high-anorthite plagioclases that are absent from the Lokon volcano andesites. The second type of melts produced compositionally similar clinopyroxenes and plagioclases of both basalts and andesites. Similarities in compositions of homogeneous glasses of melt inclusions in minerals from the Lokon volcano and other volcanoes of the Sulawesi Island and the SW Pacific suggest similar P-T conditions for the formation of magmatic systems. In particular, the data on inclusions demonstrate that basaltic magmas of the Lokon and Sopotan volcanoes are primitive melts ( $\text{SiO}_2 = 48.2\text{--}51.5$  wt.% and MgO up to 8 wt.%), which is consistent with the content of other oxides. These inclusions plot at the beginning of the «andesitic» trends in variation diagrams. Accordingly, these melts could be primary melts for the development of the entire magmatic system that formed andesitic to basaltic effusive rocks of the Tondono caldera and the Lokon and Sopotan volcanoes. Based on the compositions of both, melt inclusions and their host minerals in Lokon basalts, we concluded that clinopyroxene phenocrysts crystallized at two levels: 20.6–14.5 km (1150–1130°C) and 13–6 km (1145–1105°C), and plagioclase phenocrysts crystallized at 1160–1120°C. In general, our data on melt inclusions and phenocrysts indicate fundamental differences in the PTX parameters of the magmatic systems that formed basalts and andesites of the Sulawesi Island. The basalt-hosted clinopyroxene phenocrysts crystallized from compositionally stable melts at a slightly decreasing temperature with a significant pressure drop during magma ascent. Phenocryst crystallization in andesites proceeded differently: with delays at constant pressures in deep intermediate chambers and a significant drop in temperature, which facilitated the processes of fractionation and evolution of melts.

**Key words:** basalts, clinopyroxenes and plagioclases, melt inclusions, Sulawesi Island, Pacific Ocean.