



## СОСТАВ КЛИНОПИРОКСЕНОВ – ОСНОВА ДЛЯ ВЫЯСНЕНИЯ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ АНДЕЗИТОВ ОСТРОВА СУЛАВЕСИ (ИНДОНЕЗИЯ)

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

<sup>1</sup> Новосибирск, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, kotlyarov@igm.nsc.ru

<sup>2</sup> Новосибирск, Новосибирский национальный исследовательский государственный университет

Петрогенезис вулканических пород современных надсубдукционных магматических систем до сих пор остается актуальным вопросом, особенно в отношении таких геологически сложных регионов, как Индонезия. Взаимодействие нескольких литосферных плит и присутствие нескольких микроконтинентов в регионе – все это влияет на процессы магмогенерации и усложняет интерпретацию как геохимических, так и минералогических данных. Весьма актуальными остаются детальные исследования петрогенезиса лав, особенно на основании изучения состава минералов-вкрапленников, и вычисленные на их основе Р-Т-параметры кристаллизации магматических расплавов.

Нами получены первые данные о составе клинопироксенов из пород северо-восточной части острова Сулавеси, Индонезия. Исследования эффузивных комплексов этого района имеют важное значение для расшифровки катастрофических процессов извержения, сопровождающихся масштабным кальдерообразованием. Здесь на относительно локальной площади располагаются кальдера Тондано и типичные постройки вулканов Сопутан и Локон [1], что позволило одному из авторов сообщения собрать представительную коллекцию эффузивов из разных структур этого района. При аналитической обработке наиболее детально были исследованы клинопироксены из андезитов кальдеры Тондано.

При сравнительном анализе полученных результатов использовались опубликованные данные по составу пироксенов из известных объектов, среди которых выделяется изученный нами вулкан Горелый на Камчатке [2] в связи с тем, что там сосуществуют (как и в случае острова Сулавеси) типичные вулканические постройки и более древняя кальдера, а также эффузивные комплексы Идзу-Бонинской дуги.

Химический состав клинопироксенов установлен в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (г. Новосибирск) и в ИГМ СО РАН (г. Новосибирск) на электронном сканирующем микроскопе MIRA 3 LMU [(Tescan Orsay Holding) с системой микроанализа INCA Energy 450+ XMax 80 (Oxford Instruments Nanoanalysis Ltd)], а также на микроанализаторе JEOL JXA-8100 SuperProbe.

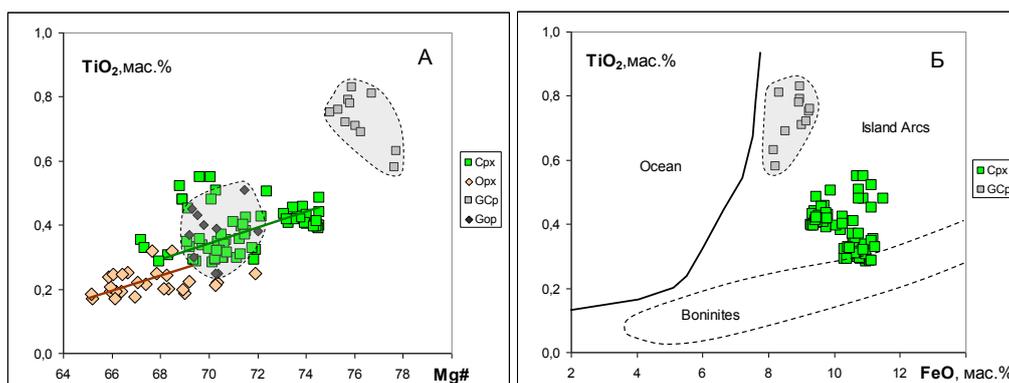
Клинопироксены в андезитах острова Сулавеси обычно совместно с ортопироксенами входят в состав многофазных вкрапленников.

По соотношению миналов (En-Wo-Fs) вкрапленники клинопироксена в андезитах острова Сулавеси относятся к авгиту, совпадая практически с данными по клинопироксенам из базальтовых эффузивов многих островных дуг.

На диаграммах зависимости химических компонентов от магнезиальности клинопироксены из андезитов острова Сулавеси показывают заметно меньшие содержания Ti и Al, а также пониженные значения магнезиальности по сравнению с пироксенами из базальтов вулкана Горелый. При этом для пироксенов острова Сулавеси наблюдается эволюция составов с падением TiO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на фоне уменьшения Mg# (рисунок, А).

Вкрапленники клинопироксена являются хорошими индикаторами геодинамической обстановки формирования эффузивов. Для этого используются многочисленные диаграммы, часть из которых прошла проверку на реальных эталонных объектах и используется нами на вполне обоснованных основаниях.

На тройной диаграмме SiO<sub>2</sub>/100 – TiO<sub>2</sub> – Na<sub>2</sub>O клинопироксены из андезитов острова Сулавеси располагаются компактной группой, перекрывая поля пироксенов из известково-щелочных и толеитовых пород островных дуг.



### Диаграммы $\text{TiO}_2$ – $\text{Mg\#}$ и $\text{TiO}_2$ – $\text{FeO}$ для вкрапленников клинопироксенов.

(А) – Клинопироксен (Срх) и ортопироксен (Орх) из андезитов острова Сулавеси. Серыми полями обозначен состав вкрапленников клино- (GCp) и ортопироксенов (GOp) из базальтовых пород вулкана Горелый, Камчатка [2]. (Б) – Клинопироксены из андезитов острова Сулавеси (Срх) и из базальтов вулкана Горелый (GCp). Серым полем обозначен состав клинопироксенов из базальтовых пород вулкана Горелый (Камчатка). Поля клинопироксенов [3]: Ocean – из океанических пород; Island Arcs – из островодужных пород; Boninites – из бонинитов.

По соотношению  $\text{TiO}_2$  –  $\text{FeO}$  клинопироксены из андезитов острова Сулавеси находятся в области пироксенов из эффузивов островных дуг. Часть из них попадает в поле пироксенов из бонинитов (рисунок, Б), что свидетельствует о возможном участии расплавов примитивных островных дуг при формировании андезитов острова Сулавеси.

На основе данных по составу клинопироксенов с использованием программы WinPLtb [4] выяснены P-T-параметры кристаллизации вкрапленников пироксена. Состав расплава был оценен на основе оригинальных анализов гомогенных стекол прогретых включений в клинопироксене. Установлено, что клинопироксен из андезитов северо-востока острова Сулавеси начал кристаллизоваться на глубине 17–11 км. Температура в этой промежуточной камере составляла 1180–1130 °С. При подъеме магматических систем кристаллизация клинопироксенов происходила на уровне 9–6 км при 1135–1115 °С. Наличие двух подобных уровней (магматических камер) формирования фенокристаллов установлено нами ранее для вулкана Горелый [2].

В целом проведенные исследования клинопироксенов показали, что формирование андезитов острова Сулавеси происходило из расплавов, переходных по составу от толеитов к известково-щелочным. При этом для рассмотренных клинопироксенов характерны значительно меньшие содержания титана, чем в пироксенах из базальтов вулкана Горелый, и ассоциация с пироксенами из бонинитов (рисунок), что свидетельствует об участии при формировании эффузивов острова Сулавеси более примитивных магм по сравнению с магматическими системами развитой Курило-Камчатской островной дуги. Эти выводы согласуются с результатами наших исследований геохимических особенностей эффузивов северо-востока острова Сулавеси.

Также необходимо отметить, что полученные нами на основе изучения клинопироксенов P-T-параметры позволили выделить две промежуточные магматические камеры, в которых (на глубине 17–11 и 9–6 км) происходила кристаллизация (при температуре 1180–1130 и 1135–1115 °С) минералов из андезитов острова Сулавеси.

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

- [1] Pallister K.J.S., Bina K.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 // Bulletin Volcanology. 2012. V. 74. P. 1581–1609.
- [2] 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.
- [3] Куренков С.А., Диденко А.Н., Симонов В.А. Геодинамика палеоспрединга. М.: ГЕОС, 2002. 249 с.
- [4] Yavuz F., Yildirim D.K. A Windows program for pyroxeneliquid thermobarometry // Periodico di Mineralogia. 2018. V. 87. № 2. P. 149–172.