

Новые данные по изотопам кислорода свидетельствуют о том, что внутрикальдерные игнимбриты ВК демонстрируют низкие значения  $\delta^{18}\text{O}$ , достигающие  $-5.03\text{‰}$ , и  $\delta\text{D}$   $-182\text{‰}$  в диапазоне глубин 1.2 км в нескольких отобранных разрезах [Vialichka et al., 2024]. Результаты подтверждают существование массивной метеорно-гидротермальной системы на протяжении длительной истории остывания пирокластических потоков, образующих игнимбритовые толщи ВК. По нашим оценкам, значения  $\delta^{18}\text{O}$  метеорной воды составляют всего от  $-19$  до  $-23\text{‰}$ , что намного ниже таковых современных осадков ( $-14$  или  $-16\text{‰}$ ), оцененных для климата Камчатки, потеплевшего на  $2\text{--}3\text{ °C}$  в конце миоцена. Таким образом, метеорно-гидротермальная система ВК зависела от высотных осадков и ледников.

*Исследование выполнено в рамках проекта РНФ № 22-77-10019, <https://rscf.ru/project/22-77-10019/>.*

## Литература

*Бергаль-Кувикас О.В., Розозин А.Н., Кляпицкий Е.С.* Использование сравнительного анализа распространения и происхождения кальдер с базальт-андезитовым составом магм для изучения генезиса миоценовых игнимбритов Восточного вулканического пояса Камчатки // Геодинамика и тектонофизика. 2019. Т. 10. №. 3. С. 815–828.

*Bergal-Kuvikas O., Leonov V., Rogozin A., Bindeman I., Kliapitskiy E., Churikova T.* Stratigraphy, structure and geology of Late Miocene Verkhnevachinskaya caldera with basaltic-andesitic ignimbrites at Eastern Kamchatka // Journal of Geosciences. 2019. Vol. 64. P. 229–250.

*Ehlers T.A., Poulsen C.J.* Influence of Andean uplift on climate and paleoaltimetry estimates // Earth and Planetary Science Letters. 2009. Vol. 281. P. 238–248.

*Vialichka K., Bindeman I., Bergal-Kuvikas O., Rogozin A.* Paleoaltimetry and paleotectonic reconstruction using triple oxygen and hydrogen isotopes: depleted  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta\text{D}$  values in ignimbrites of Verkhnevachinskaya caldera in Kamchatka // Article in press. Available at SSRN. 2024. 4707329.

*Rowley D.B., Pierrehumbert R.T., Currie B.S.* A new approach to stable isotope-based paleoaltimetry: Implications for paleoaltimetry and paleohypsometry of the high Himalaya since the late Miocene // Earth and Planetary Science Letters. 2001. Vol. 188. P. 253–268.

**В.А. Симонов, А.В. Котляров**

*Институт геологии и минералогии*

*им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, Россия*

*kotlyarov@igm.nsc.ru*

## **Физико-химические параметры формирования вулканогенных комплексов Камчатки (термобарогеохимические данные)**

**V.A. Simonov, A.V. Kotlyarov**

*Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia*

## **Physicochemical parameters of Kamchatka volcanogenic complexes formation: fluid inclusion data**

**Abstract.** Physicochemical conditions of volcanic island-arc magmatism in Kamchatka are established as a result of mineralogical and fluid inclusion studies. The composition of melt inclusions and minerals indicated the *PT*-parameters of magmatic systems of a number of volcanoes: Tolbachik, Ichinsky, Uksichan and Gorely. The depths of crystallization of minerals for these volcanoes are determined; they are consistent with geophysical data on the levels of accumulation (reservoirs) of magma. For Gorely Volcano, the presence of primary syngenetic melt and fluid inclusions is established directly indicating the phase separation (boiling)

of the melt and confirming seismic data.

Вулканы Камчатки привлекают к себе пристальное внимание, т. к. позволяют выявить основные закономерности современного островодужного магматизма, без знания которых вряд ли возможно корректно расшифровать процессы развития древних переходных зон океан-континент и связанных с ними месторождений полезных ископаемых. Исследования вулканов Камчатки представляют не только научный интерес, но имеют и практическое значение из-за возможных последствий катастрофических извержений. Как показали наши исследования, наиболее перспективным путем выяснения физико-химических параметров формирования вулканогенных комплексов Камчатки является использование методов термобарогеохимии для изучения расплавных и флюидных включений в минералах. Кроме данных по включениям, значение имеет анализ составов минералов-вкрапленников из эффузивов.

Большинство рассмотренных вулканогенных комплексов Камчатки сформировалось при участии однородных магматических систем, реликты которых захватывались минералами в виде первичных расплавных включений. В то же время, иногда наблюдаются сингенетичные первичные расплавные и флюидные включения, что свидетельствует о возможном вскипании магмы и кристаллизации минералов из гетерофазных расплавов.

В первом случае высокотемпературные эксперименты по гомогенизации и последующие анализы закалочных стекол в первичных включениях позволяют выяснить составы расплава, а также температуры кристаллизации. На основе этой информации и данных по составам минералов можно оценить давление и глубины образования вкрапленников из эффузивов Камчатки. Давление при кристаллизации минералов рассчитано в программе PETROLOG [Danyushevsky, Plechov, 2011] на основе состава расплава и его температуры. РТ-условия кристаллизации пироксена определены в программе WinPLtb, основанной на соотношениях составов пироксена и расплава, из которого он кристаллизуется [Yavuz, Yildirim, 2018]. Для расчета давлений и температур магматических процессов применены амфиболовые барометры [Schmidt, 1992] и термобарометры [Ridolfi et al., 2010]. В случае фазовой сепарации магмы при формировании отдельных вулканогенных комплексов Камчатки основное внимание уделялось анализу состава первичных флюидных включений, сингенетичных расплавам.

Физико-химические параметры вулканогенного магматизма Камчатки определены на основе данных по расплавам включениям и минералам из образцов эффузивных пород, отобранных на склонах вулканов Толбачик, Ичинский, Уксичан и Горелый [Добрецов и др., 2016, 2019; Симонов и др., 2021].

*Вулкан Толбачик.* Кристаллы-лапилли плагиоклаза образовались из базальтовых расплавов при температурах 1115–1075 °С и в условиях низких (до 1 кбар) давлений на глубине 3–2 км. Кристаллизация минералов андезитов происходила при более широких параметрах (1220–1020 °С и 3.3–1.6 кбар) в промежуточной камере на глубинах до 10 км. Источником расплавов послужили очаги базальтовой магмы (фиксируемые геофизическими методами на глубинах 18–20 км) с минимальными температурами около 1290 °С. Для вулкана установлены три промежуточных камеры на глубинах 21–18, 10–5 и менее 3 км. Эти параметры хорошо согласуются с геофизическими данными, свидетельствующими о трех уровнях накопления (резервуарах) магмы под вулканом на глубинах около 20, 5 и 0 км [Belousov et al., 2015].

*Вулкан Ичинский.* Установлено три уровня промежуточных камер. На глубинах до 23 км и температурах до 1225 °С происходило формирование андезитов. В промежуточной камере (14 км) при 1135–1104 °С в результате дифференциации андезитовых магм образовались дацитовые расплавы. На самых верхних горизонтах (9–3 км) при температурах 1130–1030 °С сформировались дациты. На глубинах 22–19 км и при температурах 980–930 °С кристаллизовались амфиболы андезитов. При подъеме на более высокий уровень (16–11 км) и при снижении температуры от 945 до 880 °С совместно образуются амфиболы андезитов и дацитов.

*Вулкан Уксичан.* Исследования расплавных включений позволили оценить давления при ликвидусной кристаллизации клинопироксенов и плагиоклазов из базальтовых магм и в результате установить четыре интервала глубин формирования этих минералов: около 60, 45–30, 27–18 и от 12 км до близповерхностных условий. Данные по включениям свидетельствуют о близких температурах кристаллизации разных минералов в базальтах вулкана: плагиоклаз – 1240–1175 °С, ортопироксен – 1225–1180 °С, клинопироксен – 1215–1190 °С. На глубинах 18–16 км при температурах 1010–985 °С кристаллизовались амфиболы латитов вулкана. На заключительной стадии в диапазоне температур 900–810 °С в ходе подъема расплавов с 10 до 3 км образовывались амфиболы дацитов.

*Вулкан Горелый,* как показали сейсмические данные [Kuznetsov et al., 2017], сохранил возможность извержения со взрывом до настоящего времени. Учитывая, что в его истории развития уже наблюдался мощный этап извержения, во время которого образовалась кальдера обрушения диаметром около 12 км, исследования магматических систем этого вулкана приобретают особое значение. На основе данных по расплавным включениям и минералам установлены два уровня кристаллизации минералов (21–15 км и 9–2 км), характерные для докальдерного (вулкан Пра-Горелый) и посткальдерного (вулкан Молодой Горелый) этапов. Верхний уровень свидетельствует о наличии близповерхностного магматического очага, наиболее вероятно ответственного за катастрофическое извержение. Определены температурные режимы кристаллизации минералов для вулкана Пра-Горелый (1240–1190 °С) и для вулкана Молодой Горелый (1190–1125 °С).

На основании сейсмической информации ранее был сделан вывод о том, что вулкан Горелый буквально насыщен газом и представляет собой огромный «паровой котел» [Kuznetsov et al., 2017]. Наши данные о присутствии в минералах из эффузивов этого вулкана первичных флюидных включений подтверждают эти сейсмические выводы. Присутствие сингенетичных расплавных и флюидных включений прямо свидетельствует о фазовой сепарации (вскипании) расплава, являющейся, по мнению многих исследователей, причиной катастрофических извержений. Детальные исследования с помощью КР-спектроскопии и криометрии показали преобладание  $\text{CO}_2$  в первичных флюидных включениях и отсутствие других газов и паров  $\text{H}_2\text{O}$ . Таким образом, в «паровом котле» вулкана Горелый происходило кипение углекислоты. Полученные нами результаты не означают, что в расплавах вулкана Горелый отсутствовала вода, однако ее количество было недостаточно для образования самостоятельных фаз в расплаве.

Физические эксперименты показывают реальность процессов фазовой сепарации (вскипания) насыщенного углекислотой расплава под вулканом Горелый. В наших опытах (с моделями размерами 10 см) первоначально гомогенная жидкость (насыщенная  $\text{CO}_2$ ) резко вскипает одновременно по всему объему с образованием множества газовых пузырьков  $\text{CO}_2$  при падении давления в результате мгновенной разгерметизации системы. В дальнейшем, в ходе дегазации наблюдается подъем облака пузырьков  $\text{CO}_2$ . Более масштабные эксперименты на установке высотой около 18 м [Озеров, 2019] показывают, что газонасыщенный ( $\text{CO}_2$ ) раствор, поступающий в нижнюю часть подводящего канала, однородный и не содержит свободной газовой фазы. При подъеме раствора по каналу, вследствие снижения давления, происходит образование пузырьков и их последующий рост и подъем. При выходе на поверхность подобных «кипящих» жидкостей (расплавов) могут возникнуть взрывные выбросы – взрывы [Озеров, 2019].

Таким образом, полученные факты о присутствии в минералах сингенетичных расплавных и флюидных включений подтверждаются экспериментами по физическому моделированию, а также геофизическими данными, свидетельствуя о значительной роли фазовой сепарации расплавов в ходе развития магматических систем вулкана Горелый.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИГМ СО РАН (№ 122041400057-2).*

## Литература

Добрецов Н.Л., Симонов В.А., Котляров А.В., Карманов Н.С. Физико-химические параметры магматизма в районах вулканов Уксичан и Ичинский (Срединный хребет Камчатки) // Геология и геофизика. 2019. Т. 60. С. 1353–1383.

Добрецов Н.Л., Симонов В.А., Котляров А.В. и др. Физико-химические параметры кристаллизации расплавов в промежуточных надсубдукционных камерах (на примере вулканов Толбачинский и Ичинский, Камчатка) // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. С. 1265–1291.

Озеров А.Ю. Ключевской вулкан: вещество, динамика, модель. М.: ГЕОС, 2019. 306 с.

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 расплавному и флюидным включениям // Геология и геофизика. 2021. Т. 62. С. 103–133.

Belousov A., Belousova M., Edwards B., Volynets A., Melnikov D. Overview of the precursors and dynamics of the 2012–13 basaltic fissure eruption of Tolbachik Volcano, Kamchatka, Russia // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2015. Vol. 307. P. 22–37.

Danyushevsky L.V., Plechov P.Yu. Petrolog 3: Integrated software for modeling crystallization processes // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2011. Vol. 12. Q07021.

Kuznetsov P.Y., Koulikov I., Jakovlev A. et al. Structure of volatile conduits beneath Gorely volcano (Kamchatka) revealed by local earthquake tomography // Geoscience. 2017. Vol. 7. Article #111.

Ridolfi F., Renzulli A., Puerini M. Stability and chemical equilibrium of amphibole in calc-alkaline magmas: an overview, new thermobarometric formulations and application to subduction-related volcanoes // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2010. Vol. 160. P. 45–66.

Schmidt M.W. Amphibole composition in tonalite as a function of pressure: an experimental calibration of the Al-in-hornblende barometer // Contributions to Mineralogy and Petrology. 1992. Vol. 110. P. 304–310.

Yavuz F., Yildirim D.K. A Windows program for pyroxene-liquid thermobarometry // Periodico di Mineralogia. 2018. Vol. 87. P. 149–172.

**Н.В. Дмитриева, В.А. Симонов, И.Ю. Сафонова, А.В. Котляров**

*Институт геологии и минералогии  
им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, Россия  
kotlyarov@igm.nsc.ru*

### **Условия кристаллизации вкрапленников клинопироксена из эффузивных пород острова Сулавеси (Тихий океан)**

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

*Sobolev Institute of Geology and  
Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia*

### **Crystallization conditions of clinopyroxene phenocrysts from effusive rocks of Sulawesi Island (Pacific Ocean)**

**Abstract.** Study of minerals and melt inclusions showed that clinopyroxenes in basalts of Sulawesi Island (Pacific Ocean) crystallized during magma ascent as pressure and temperature decreased from 7 to 0.5 kbar and from 1170 to 1080 °C, respectively. A low-temperature melt (995–950 °C) was also involved in the formation of «andesitic» clinopyroxenes in addition to «basaltic» magma (with higher temperatures). The crystallization of clinopyroxenes in dacites occurred from a low-temperature melt (1055–950 °C) at higher pressure (up to 7 kbar). Clinopyroxenes crystallized under influence of two chemically contrasting magmatic systems: basaltic and dacitic. The andesitic clinopyroxene-forming magma is considered intermediate.