

Состав расплавов, формировавших мафические включения в андезитах вулкана Молодой Шивелуч (извержение 2023 г.)

Толстых М.Л.^{1,2}, Горбач Н.В.², Филоsofova Т.М.², Крашенинников С.П.¹, Бочарников Р.Е.³

Composition of melts that formed mafic enclaves in andesites of Young Shiveluch volcano (2023 eruption)

Tolstykh M.L., Gorbach N.V., Filosofova T.M., Krasheninnikov S.P., Bocharnikov R.E.

¹ *Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, г. Москва; e-mail: mashtol@mail.ru*

² *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский*

³ *Institut für Geowissenschaften, Gutenberg Universität Mainz, Mainz, Germany*

На основе термобарогеохимических данных показано, что оливин мафических включений в андезитах извержения 2023 г. вулкана Молодой Шивелуч кристаллизовался из расплава, близкого по составу к породам эруптивного центра 7600 °С – одного из немногих проявлений базитового вулканизма в голоценовой истории данного вулканического центра.

Мафические включения (меланократовые включения, анклавы) в андезитах островодужных вулканов фиксируют присутствие более основных магм в питающих магматических системах и служат прямыми объектами для реконструкции их состава [например, 6]. В андезитах современных извержений вулкана Молодой Шивелуч оливинсодержащие включения андезибазальтового-базальтового состава впервые были задокументированы в отложениях пирокластического потока 2005 г. [2] и в продуктах извержения 2010 г. [6]. Аналогичные включения обнаружены и в материале извержения 2023 г. [3], ставшего наиболее мощным за последние ~60 лет активности вулкана.

Для реконструкции условий кристаллизации оливина, а также определения состава минералообразующих расплавов была проведена серия термобарогеохимических экспериментов. Из образца мафического включения-анклава (53.8 мас. % SiO₂, 9.9 мас. % MgO, ~7-8 об. % оливина [3]) были отобраны зерна оливина с частично или полностью раскристаллизованными включениями расплава. Включения были немногочисленны и невелики по размеру. Гомогенизация стекол расплавных включений в оливине проводилась в высокотемпературной вертикальной трубчатой печи Nabertherm RHTV-1700 (ГЕОХИ РАН) при атмосферном давлении и контролируемой летучести кислорода, соответствовавшей буферу QFM+1. Для проведения высокотемпературных исследований была выделена монофракция оливина, зерна помещены в платиновые ампулы и подвержены однократному нагреву и выдержке 5 мин при температуре 1250 °С с последующей закалкой. В результате полностью раскристаллизованные включения были преобразованы в стекловатые, пригодные для анализа. Зерна были запрессованы в шашку из эпоксидной смолы, и включения выведены на поверхность, после чего составы минералов и стекло исследовались на микроанализаторе. Еще одна группа зерен оливина была прогрета до температуры 1400 °С в условиях повышенного давления (15 Кбар) при помощи установки типа цилиндр-поршень в Университете Гутенберга, в результате чего были получены включения с крайне малыми или полностью исчезнувшими газовыми пузырьками, что позволило оценить минимальные содержания летучих компонентов в стекле.

Составы минералов и стекол измерены при помощи сканирующего электронного микроскопа Vega 3 Tescan, оборудованного энергодисперсионным спектрометром Oxford X-max 80mm 2 в ИВиС ДВО РАН. Содержания летучих компонентов в стеклах включений измерены при помощи рамановского спектрометра Renishaw inVia (лазер 532 нм) в ГЕОХИ РАН.

Оливин

Изученные зерна оливина (рис. 1а) представлены магнезиальными разностями Fo_{89-92} в центральных частях зерен и более железистыми – до Fo_{83} в их краевых частях. В оливине встречаются включения хром-шпинелида и шпинели. Также вокруг зерен распространены оторочки, сложенные ортопироксеном (En_{73-80}), часто в виде агрегата шарообразных выделений.

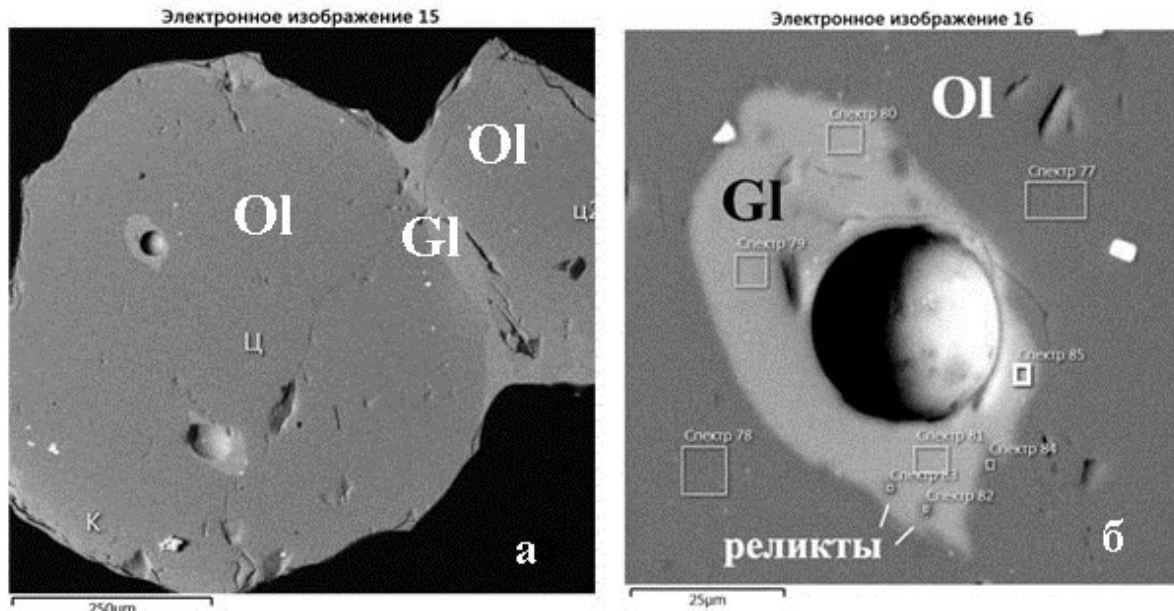


Рис. 1. Зерно оливина (Ol) Fo_{92} с расплавленными включениями и заливом стекла (Gl) по границе зерна (а); стекловатое включение в оливине с реликтами минералов (б). Изображения в отраженных электронах получены с помощью СЭМ (ИВиС ДВО РАН).

Состав расплавленных включений в оливине

Расплавленные включения в оливине не превышают 30-60 мкм в диаметре (рис. 1б); кроме того, отличительной особенностью этих включений являются крупные размеры газового пузырька (до 11-12 об. % включения), которые были зафиксированы и для частично раскристаллизованных включений до начала эксперимента. Возможно, объем пузырька отражает флюидонасыщенность расплава. Действительно, полученные минимальные оценки содержаний флюидных компонентов в стекле гомогенизированных включений довольно значительны: до 1.45 мас. % H_2O , до 3400 ppm CO_2 .

Расплавленные включения были выдержаны 5 минут при температуре 1250 °C и атмосферном давлении, что обеспечило расплавление практически всех дочерних минералов во включениях. Однако в этом эксперименте полная гомогенизация не зафиксирована. Помимо газового пузырька, в стекле сохранились округлые реликты минеральных фаз размером до 3 мкм, составляющие от 0.02 до 0.3 % общего объема включения (рис. 1б). Исходя из геометрических подсчетов (средний объем включения 37680 мкм^3 , объем стекла 33493 мкм^3 , объем фазы 112 мкм^3), эти остаточные фазы не превышают десятых долей процента объема стекла, и для первоначальных оценок состава минералообразующего расплава ими можно пренебречь.

Составы расплавов были пересчитаны с учетом возможных постзахватных изменений при помощи программного пакета Petrolog [5]. Расчетные температуры для полученных пар оливин-расплав составили 1244-1267 °C. Поля составов, полученных в ходе пересчетов, представлены на вариационных диаграммах (рис. 2), за исключением диаграммы SiO_2-FeO , поскольку диапазон содержаний FeO_{value} (7-9 мас. %) – это величина, заданная при пересчете, согласно значениям FeO в валовых составах мафических анклавов [3, 6].

Для сопоставления составов различных компонентов магматической системы вулкана Молодой Шивелуч на вариационные диаграммы были нанесены также: а) составы заливов стекла в периферийных частях изученных зерен оливинов; б) валовые составы мафических включений-анклавов; в) составы андезитов извержения 2023 г., вмещающих мафические анклавы; г) матричные стекла и стекла расплавных включений в минералах пеплов извержения 2023 г.; д) составы тефры базитового эруптивного центра с возрастом 7600 ¹⁴С л.н., расположенного в юго-западном секторе подножия вулкана Шивелуч [4]. Этот эруптивный центр – одно из немногих проявлений базитового вулканизма в голоценовой истории крупнейшего на Камчатке андезитового вулканического центра [7].

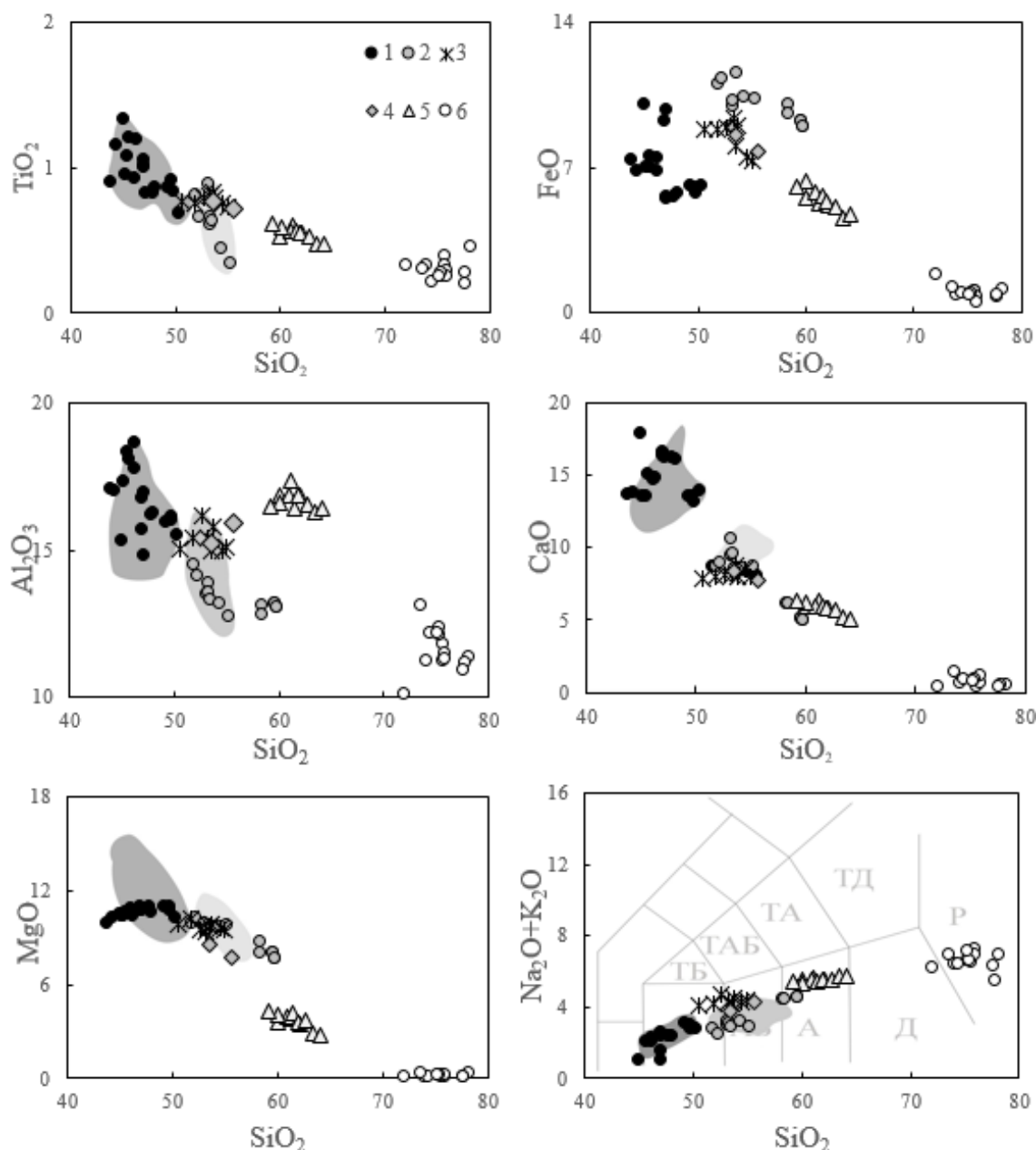


Рис. 2. Вариационные диаграммы для пород и расплавов вулкана Молодой Шивелуч. 1 – расплавные включения в оливине мафических включений-анклавов; 2 – заливов расплава на периферии зерен оливина; 3 – тефра и лавы базитового центра 7600 ¹⁴С л.н. [4, 7]; 4 – валовый состав мафического включения-анклава из андезита извержения 2023 г. [3]; 5 – лавы и тефра извержения вулкана 2023 г.; 6 – стекла пеплов извержения 2023 г. [1]. Поля – реконструированные составы включений и заливов стекла.

Соотношения составов расплавов и пород вулкана Молодой Шивелуч

1. Оливины мафического включения-анклава из андезитов вулкана Молодой Шивелуч извержения 2023 г. кристаллизовались из базальт-пикробазальтового расплава (SiO_2 45-51 мас. %, MgO 8-11 мас. %), с $\text{Mg\#} > 0.6$, по составу чрезвычайно близкого к вулканитам базитового центра 7600 ^{14}C л.н. Валовой состав анклава также практически соответствует полю пород данного эруптивного центра (рис. 2). Таким образом, можно предполагать, что глубинный источник базитового вещества, образовавший на поверхности эруптивный центр ~ 7600 л.н., продолжает существовать, поставляя в приповерхностный очаг новые порции базальтовых магм, сохраняющихся в качестве разноразмерных мафических включений в андезитах современных извержений.

2. Состав расплава, образовавшего заливы в периферических частях зерен оливина, варьирует от базальта до андезита (SiO_2 51-61 мас. %), и сам расплав вполне может рассматриваться как продукт дифференциации исходных базальт-пикробазальтовых магм. Однако наиболее кислые разности этих стекол отличаются от типичных андезитов вулкана Молодой Шивелуч более низкими содержаниями TiO_2 , Al_2O_3 , и высокими – FeO , MgO .

3. Ювенильные породы (лавы и грубый пепел) извержения 2023 г. являются андезитами. Матричные стекла и расплавные включения в минералах андезитов извержения 2023 г., как и большинства пород, изверженных вулканом в голоцене, по составу соответствуют риодацитам-риолитам, представляя собой наиболее обогащенный кремнеземом компонент магматической системы вулкана Шивелуч. На вариационных диаграммах поле андезитов Молодого Шивелуча располагается на тренде, соединяющем поля базитовых и кислых расплавов, что согласуется с представлениями о гибридном происхождении этих пород.

Работа выполнена с использованием ресурсов ЦКП ИВиС ДВО РАН «Камчатский центр элементного, минерального, изотопного анализа» при поддержке Российского научного фонда, грант № 25-27-20039 (<https://rscf.ru/project/25-27-20039/>) и госзадания Института геохимии и аналитической химии им. Вернадского РАН.

Список литературы

1. Бабанский А.Д., Толстых М.Л., Мельников Д.В. и др. Характерные особенности пепла извержения вулкана Шивелуч в апреле 2023 года // Материалы ежегодной научной конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы». Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2024. С. 18-22.
2. Горбач Н.В., Портнягин М.В. Геологическое строение и петрология лавового комплекса вулкана Молодой Шивелуч, Камчатка // Петрология. 2011. Т. 19. № 2. С. 140-172.
3. Горбач Н.В., Философова Т.М. Состав ювенильных андезитов и ассоциирующих с ними мафических включений, изверженных вулканом Шивелуч в апреле 2023 г. // Материалы XXVII ежегодной научной конференции, посвященной Дню вулканолога, 28-29 марта 2024 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2024. С. 60-63.
4. Чурикова Т.Г., Гордейчик Б.Н., Белоусов А.Б., Бабанский А.Д. Находка центра извержения базальтов на вулкане Шивелуч // Материалы Всероссийской конференции, посвященной 75-летию Камчатской вулканологической станции. Петропавловск-Камчатский, 2010. С. 96-100.
5. Danyushevsky L.V., Plechov P. Petrolog3: Integrated software for modeling crystallization processes // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2011. V. 12. Is. 7. Art. Q07021.
6. Goltz A.E., Krawczynsky M.J., Gavrilenko M.G. et al. Evidence for superhydrous primitive arc magmas from mafic enclaves at Shiveluch volcano, Kamchatka // Contribution to mineralogy and petrology. 2020. V. 175. Art. 115. <https://doi.org/10.1007/S00410-020-01746-5>
7. Ponomareva V., Portnyagin M., Pevzner M. et al. Tephra from andesitic Shiveluch volcano, Kamchatka, NW Pacific: Chronology of explosive eruptions and geochemical fingerprinting of volcanic glass // International Journal of Earth Sciences. 2015. V. 194. P. 1454-1482. <https://doi.org/10.1007/s00531-015-1156-4>