

**Состав ювенильных андезитов и ассоциирующих с ними мафических включений, изверженных вулканом Шивелуч в апреле 2023 г.**

**Горбач Н.В., Философова Т.М.**

**Composition of the juvenile andesites and associated mafic enclaves erupted from Shiveluch volcano in April 2023**

**Gorbach N.V., Filosofova T.M.**

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

*e-mail: n\_gorbach@mail.ru*

В работе представлены первые данные по составу ювенильных продуктов, изверженных вулканом Шивелуч в апреле 2023 г. Выполнено сравнение химического и минерального составов ювенильных андезитов и мафических включений, ассоциирующих с ними, с аналогичными данными для продуктов предшествующих крупных извержений.

Извержение вулкана Шивелуч в апреле 2023 г. – одно из наиболее масштабных эруптивных событий в числе извержений вулканов Камчатки с начала текущего столетия. Объем изверженных продуктов и механизм данного извержения еще требуют всестороннего анализа и точных оценок, однако предварительные данные [1] указывают на то, что это событие стало сильнейшим после катастрофического извержения вулкана в ноябре 1964 г. В ходе извержения произошло значительное разрушение экструзивного купола, и его обломки и блоки составляют значительную часть пирокластических отложений, перекрывших долину реки Кабеку и ее притоки (рис. 1а). Для понимания динамики магматических процессов в питающей системе вулкана и оценки физико-химических условий кристаллизации андезитовых магм перед извержением крайне важно уверенно выделить ювенильную составляющую среди обилия обломочного материала в пирокластических отложениях. В сообщении описаны критерии отбора такого материала и приведены первые данные о составе ювенильных андезитов, изверженных в апреле 2023 г. На основе анализа состава минералов и вулканического стекла получены предварительные данные об условиях кристаллизации андезитовых магм перед извержением.

**Отбор образцов.** Образцы обломков и крупных блоков из отложений пирокластических потоков были отобраны в июне 2023 г. Для анализа были выбраны образцы, имеющие уверенные признаки ювенильного происхождения. К этим признакам были отнесены поверхность типа «хлебной корки» или же «цветной капусты», а также следы пластических деформаций на поверхности обломков. Кроме того, были проанализированы образцы крупных блоков, образованных в результате разрушения ранее существовавшего экструзивного купола и мафические (меланократовые) включения из таких блоков и фрагментов ювенильного материала. Содержания главных элементов и некоторых редких элементов в андезитах и мафических включениях были определены рентгенофлюоресцентным методом в Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск по методике [4]. Состав минералов и вулканических стекол был получен при помощи сканирующего электронного микроскопа Vega 3 Tescan, оборудованного энергодисперсионным спектрометром Oxford X-max 80mm<sup>2</sup> в Институте вулканологии и сейсмологии ДВО РАН.

**Петрография и химический состав ювенильных андезитов в сравнении с продуктами предыдущих извержений.** Среди собранной коллекции образцов к ювенильному материалу мы отнесли три основных типа обломков в отложениях пирокластических потоков – серые плотные андезиты с поверхностью «хлебной корки», пемзовидные белые андезиты с поверхностью типа «цветной капусты» и блоки андезитов с брекчированной текстурой, вмещающие обломки со следами пластических деформаций (рис. 1б-д).

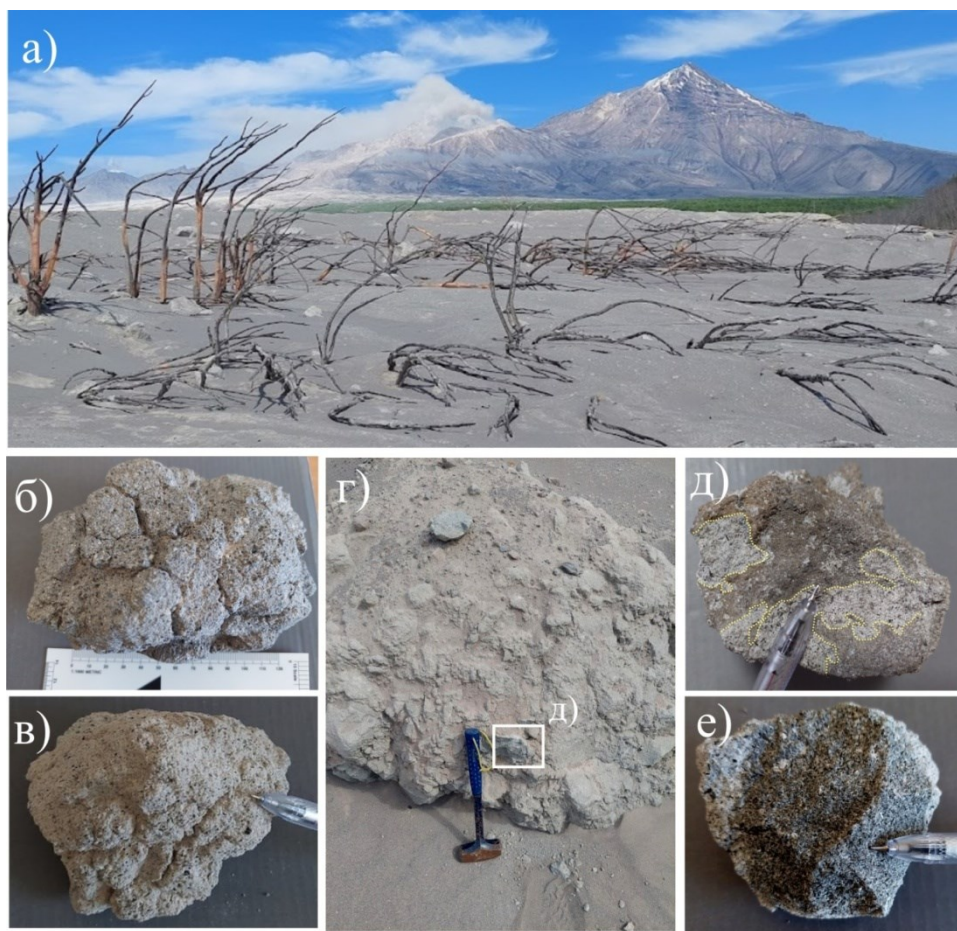


Рис. 1. Пирокластические отложения, изверженные в апреле 2023 г., и их ювенильная составляющая: а) – вид на пирокластические отложения на месте существовавшей ранее долины реки Кабеку, июнь 2023 г.; б) – серый плотный андезит с поверхностью типа «хлебная корка»; в) – белый пемзовидный андезит с поверхностью облика «цветной капусты»; г) – блок брекчированной породы; д) – фрагмент из блока брекчированной породы, желтым пунктиром выделены участки с различным цветом, текстурой и количеством вкрапленников; е) – мафическое включение в андезите.

Петрографические особенности первых двух типов типичны для андезитов, изверженных вулканом с начала 2000-х годов [3, 6, 8]. Породы содержат около 25-30 % вкрапленников плагиоклаза (*Pl*, преимущественно андезин  $An_{37-56}$ ) и около 12-15 % вкрапленников амфибола (*Amph*, магнезиальная роговая обманка, реже паргасит,  $Al_2O_3 = 7-11.5$  масс. %), а их основная масса состоит из риолитового стекла и микролитов плагиоклаза, ортопироксена и небольшого количества выделений титаномагнетита. Брекчированные породы отличаются от вышеописанных и состоят из «спекшихся» фрагментов андезитов с различным цветом основной массы, с варьирующей степенью пористости и разным количеством минералов-вкрапленников. Границы между фрагментами разной текстуры неровные, волнообразные, что указывает на брекчирование и спекание не полностью остывшей магмы. Образцы этих пород обнаруживают гетерогенную брекчированную текстуру и на микроскопическом уровне: фрагменты *Amph-Pl* андезита со стекловатой основной массой соседствуют с участками породы, которая состоит из обломков минералов и очень пористого матрикса, лишённого вулканического стекла и сложенного кварц-полевошпатовым агрегатом. Подобные брекчированные породы не были описаны ранее среди продуктов извержений, связанных с ростом современного экструзивного купола. Формирование таких пород, наиболее вероятно, могло произойти в канале вулкана непосредственно во время извержения.

По результатам химического анализа шести образцов, ювенильный материал в пирокластических отложениях, изверженных в апреле 2023 г., представлен умеренно-К известково-щелочными андезитами ( $\text{SiO}_2 = 59.5\text{-}62.7$  масс. %;  $\text{K}_2\text{O} = 1.20\text{-}1.33$  масс. %;  $\text{FeO}^*/\text{MgO} = 1.16\text{-}1.30$ ). Содержания  $\text{MgO}$  и величина магнезиальности ( $\text{Mg\#} = \text{Mg}/\text{Mg} + \text{Fe}^{2+}$ ) ювенильных андезитов составляют 3.77-4.64 масс. % и 0.58-0.62 мол. %, соответственно. Такие повышенные значения этих величин отличают породы вулкана Шивелуч от продуктов других андезитовых вулканов Камчатки и являются типичными не только для продуктов современных извержений вулкана, но и для его активности за последние 11.5 тыс. лет [2, 9].

На диаграмме  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$  (рис. 2а) видно, что валовый состав ювенильных андезитов, наряду с составом интерстициальных стекол в них, находится в пределах вариаций, типичных для продуктов современных извержений вулкана. Вместе с тем, график вариаций содержаний  $\text{SiO}_2$  в продуктах отдельных извержений (рис. 2б) обнаруживает слабую тенденцию к снижению концентрации данного компонента в андезитах, изверженных в апреле 2023 г., по сравнению с продуктами предыдущих крупных извержений с 2004 по 2019 гг.

Температура кристаллизации *Amph-Pl* минеральной ассоциации ювенильных андезитов, рассчитанная при помощи термобарометрических уравнений [7, 10] составила  $883 \pm 26$  °С.

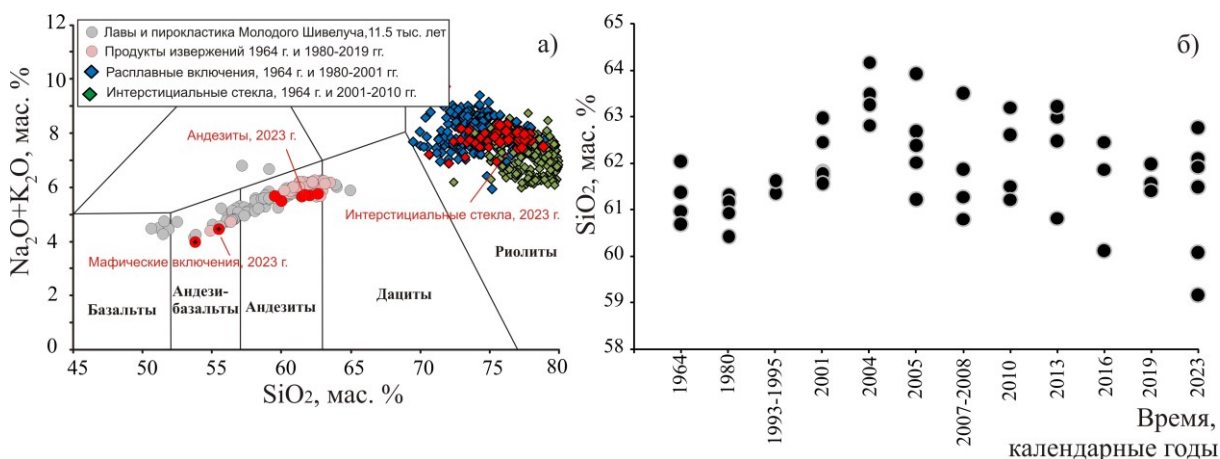


Рис. 2. Состав продуктов, изверженных вулканом Шивелуч в апреле 2023 г., по сравнению с продуктами предшествующих извержений: а) – в координатах  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$  (составы пород Молодого Шивелуча из работ [2, 9], составы андезитов извержений 1964 г. и 1980-2016 гг. по [3, 6], составы интерстициальных стекол и расплавных включений в андезитах современных извержений согласно [8, 9]); б) – вариации  $\text{SiO}_2$  в породах в зависимости от времени извержения (данные до 2016 г. из работ [3, 6], 2019 и 2023 гг. по данным настоящего сообщения).

**Мафические включения в андезитах.** В обломках ювенильного материала были обнаружены включения округлой формы темно-серого цвета размером от 5 до 20 см (см. рис. 1е). К макроскопическим особенностям, отличающим эти включения от других включений и ксенолитов, обильных в породах вулкана Шивелуч, относятся: 1) порфировая структура с заметным количеством (до 7-8 об. %) фенокристаллов оливина (*Ol*); 2) наличие крупных (до 5-7 мм) изометричных пор; 3) волнообразный контакт с вмещающим андезитом. Включения отвечают по составу высоко-Mg ( $\text{Mg\#} = 0.69\text{-}0.70$  мол. %) андезибазальтам с содержанием  $\text{SiO}_2 = 53.75\text{-}55.44$  масс. % и  $\text{MgO} = 8.63\text{-}9.95$  масс. %. В числе фенокристаллов – высоко-Mg *Ol* ( $\text{Fo}$  ядер  $90\text{-}92$ ,  $\text{Fo}$  кайм  $81\text{-}84$ ), клинопироксен (*Cpx*,  $\text{Mg\#} = 0.78\text{-}0.82$  мол. %) и *Amph* ( $\text{Al}_2\text{O}_3 = 11\text{-}13$  масс. %, паргасит и магнезио-гастингсит), которые погружены в стекловатый матрикс с обильными удлинёнными микролитами плагиоклаза (лабрадор,  $\text{An}_{57\text{-}69}$ ).

Подобные включения, обогащенные оливином (до  $\text{Fo}_{92.6}$ ), впервые были обнаружены в отложениях пирокластического потока 2005 г. [2], а их петрологические

особенности детально охарактеризованы в работах [5, 6]. В перечисленных работах происхождение мафических включений было связано с поступлением примитивной водонасыщенной магмы в малоглубинную (~5-6 км) магматическую камеру вулкана. В работе [5] показано, что примитивная магма имела температуру  $1062 \pm 48$  °C и отличалась чрезвычайно высоким содержанием воды (от 8.9 до 10.8 масс. %).

Сходство текстурных особенностей и состава минералов мафических включений, вынесенных на поверхность в 2023 г., с более ранними включениями позволяет предполагать, что все они образованы за счет фрагментации единой порции мафической магмы. В таком случае поступление андезибазальтовой магмы в малоглубинную магматическую камеру могло произойти незадолго до извержения 2005 г. Если это допущение верно, то возникает вопрос о том, какой же процесс является триггерным для каждого последующего крупного эксплозивного извержения. Альтернативно можно предположить, что каждое крупное эруптивное событие предварялось инъекцией основной магмы в малоглубинную магматическую камеру. Возможен ли такой сценарий? Для ответа на этот и другие вопросы и лучшего понимания роли мафического компонента в современном эруптивном цикле вулкана Шивелуч необходимо совместное использование петрологических и сейсмических, в том числе и ретроспективных, данных.

Работа выполнена в рамках темы НИР ИВиС ДВО РАН FWME-2024-0012.

#### Список литературы

1. *Гирина О.А., Лупян Е.А., Хорват А. и др.* Анализ развития пароксизмального извержения вулкана Шивелуч 10-13 апреля 2023 года на основе данных различных спутниковых систем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 2. С. 283-291. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-2-283-291>
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., Портнягин М.В., Филоsofova Т.М.* Динамика роста экструзивного купола и вариации химического и минералогического составов андезитов вулкана Молодой Шивелуч в 2001-2013 гг. // Вулканология и сейсмология. 2016. № 6. С. 37-61.
4. *Amosova A.A., Panteeva S.V., Chubarov V.M., Finkelshtein A.L.* Determination of major elements by wavelength-dispersive X-ray fluorescence spectrometry and trace elements by inductively coupled plasma mass spectrometry in igneous rocks from the same fused sample (110mg) // Spectrochim Acta. Part B. 2016. V. 122. P. 62-68.
5. *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>
6. *Gorbach N.V., Philosofova T.M., Portnyagin M.V.* Amphibole Record Of 1964 Plinian And Following Dome-Forming Eruptions Of Shiveluch Volcano, Kamchatka // Journal Of Volcanology and Geothermal Research. 2020. V. 407. Art. 107108. <https://doi.org/10.1016/J.Jvolgeores.2020.107108>
7. *Holland T., Blundy J.D.* Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry // Contributions to Mineralogy and Petrology. 1994. V. 116. P. 433-447.
8. *Humphreys M.C.S., Blundy J.D., Sparks R.S.J.* Shallow-level decompression crystallisation and deep magma supply at Shiveluch Volcano // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2008. V. 155. P. 45-61.
9. *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. 104. P. 1459-1482. <https://doi.org/10.1007/s00531-015-1156-4>
10. *Ridolfi F.* Amp-TB2: An Updated Model for Calcic Amphibole Thermobarometry // Minerals. 2021. V. 11. Art. 324. <https://doi.org/10.3390/min11030324>