

**Микроструктуры частиц пепла вулкана Шивелуч**  
**Толстых М.Л.<sup>1</sup>, Бабанский А.Д.<sup>2</sup>, Трубкин Н.В.<sup>2</sup>, Овсянников Г.Н.<sup>3</sup>**  
**Microstructures of volcanic ash particles of Shiveluch volcano**  
**Tolstykh M.L., Babansky A.D., Trubkin N.V., Ovsyannikov G.N.**

<sup>1</sup> Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН (ГЕОХИ), г. Москва;

e-mail: [mashtol@mail.ru](mailto:mashtol@mail.ru)

<sup>2</sup> Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (ИГЕМ), г. Москва

<sup>3</sup> Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский

Впервые для вулкана Шивелуч получены данные по микроструктурам пепловых частиц размерностью около 10 мкм. Выявлено, что даже столь мелкие частицы не являются гомогенным стеклом и содержат микрокристаллы различного состава.

Принято считать, что тонкий вулканический пепел (<35 мкм) состоит из смеси частиц вулканического стекла («glass shards») и минеральных зерен [3-5]. Действительно, микронзондовый анализ и картирование в элементах образца пепла вулкана Шивелуч (извержение 17.11.2014 г., отбор в поселке Ключи) демонстрирует преобладание частиц, по составу соответствующих риолитовому стеклу, с широкими вариациями содержаний SiO<sub>2</sub> (78-82 масс. %) и остальных компонентов (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 10.2-11.3, FeO 0.8-1.2, CaO 0.2-0.5, сумма щелочей – 5-7 масс. %). Также зафиксировано наличие зерен и обломков зерен плагиоклаза, амфибола, пироксена, кварца [2].

Для выявления соотношений стекла и минеральных зерен в тонком пепле был использован метод рентгенофазового анализа (дифрактометр Rigaku SmartLab SE при характеристиках оборудования: CuK $\alpha$  излучение (1.541 Å), Ni – фильтр, 40kV/30mA; гониометр – ВВ,  $\Theta/2\Theta$ , 2.5-65°, 4°/мин; детектор – D/tex Ultra 250, 1D). В ходе анализа порошковой (неориентированной) пробы был определен качественный (рис. 1) и количественный состав вещества. Согласно дифракционным спектрам, в образце преобладают плагиоклазы, кристобалит, присутствуют амфиболы. Количественные показатели фазового состава тонкого пепла таковы: содержание плагиоклазов составляет 84-86 %, кристобалита – 3-4 %, амфиболов – 3-5 %. Полученные спектры демонстрируют отсутствие в пепле вулканического стекла, то есть аморфной фазы, дающей устойчивое гало в определенной области дифрактограммы [1].

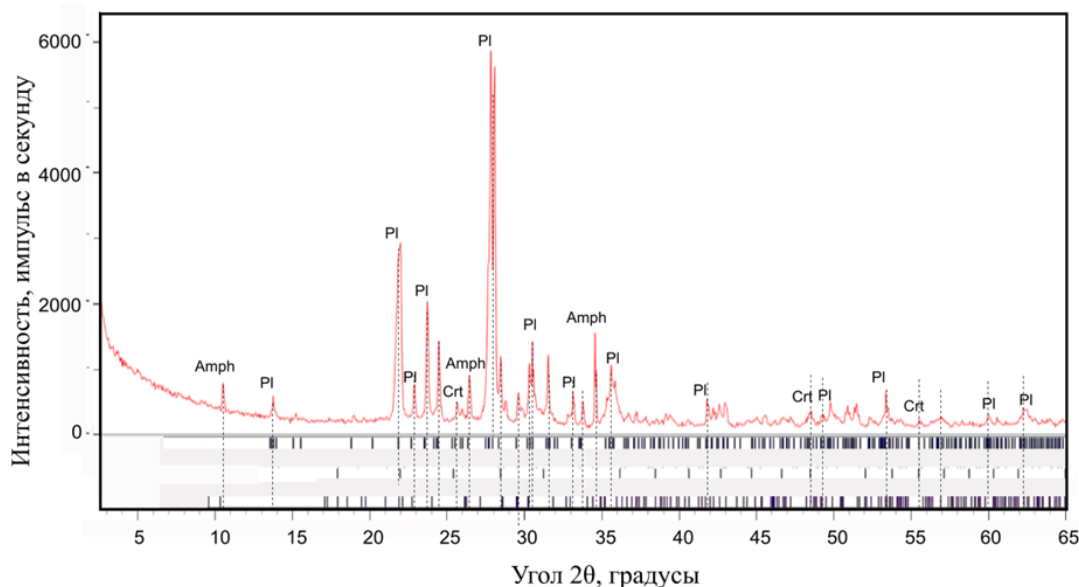


Рис. 1. Дифрактограмма пепла влк. Шивелуч, извержение 17.11.2014 г. Pl – плагиоклаз, Amph – амфибол, Crst – кристобалит.

Для объяснения противоречия между химическим составом значительной доли пепловых частиц, соответствующим вулканическому стеклу, и дифрактометрией были проанализированы микроструктуры пепловых частиц. Порошок, полученный в результате перетирания образца пепла до фракции около 10 мкм, исследовался с использованием ПЭМ – просвечивающего электронного микроскопа JEM-2100 (JEOL) с точечным разрешением 0.236 нм (200 кВ, Cs=1.7 мм), оснащенного гониометром с 2 осями наклона  $\pm 30^\circ$  и рентгеновским спектрометром X-Max 80 мм<sup>2</sup> (Оксфорд) (в сочетании с программным обеспечением AZtecTEM). Оцифрованные изображения были записаны камерами Gatan Orius C200D1. Анализ ЭДС спектров микрочастиц проводился с использованием ускоряющего напряжения 200 кВ и более высокого тока пучка при небольшом размере зонда ( $\approx 0.15$  мкм). Набор спектров длился в течение 40-60 секунд.

Наряду с фотографиями с чрезвычайно большим разрешением (рис. 2, 3) были получены дифракционные картины для различных участков пепловых частиц по технологии SAED (Selected area electron diffraction), а также проанализирован состав вещества в точке. Некоторые частицы представляют собой обломки зерен минералов (плагиоклаз, кварц, амфибол, клино- и ортопироксены), но большинство частиц сложены вулканическим стеклом.

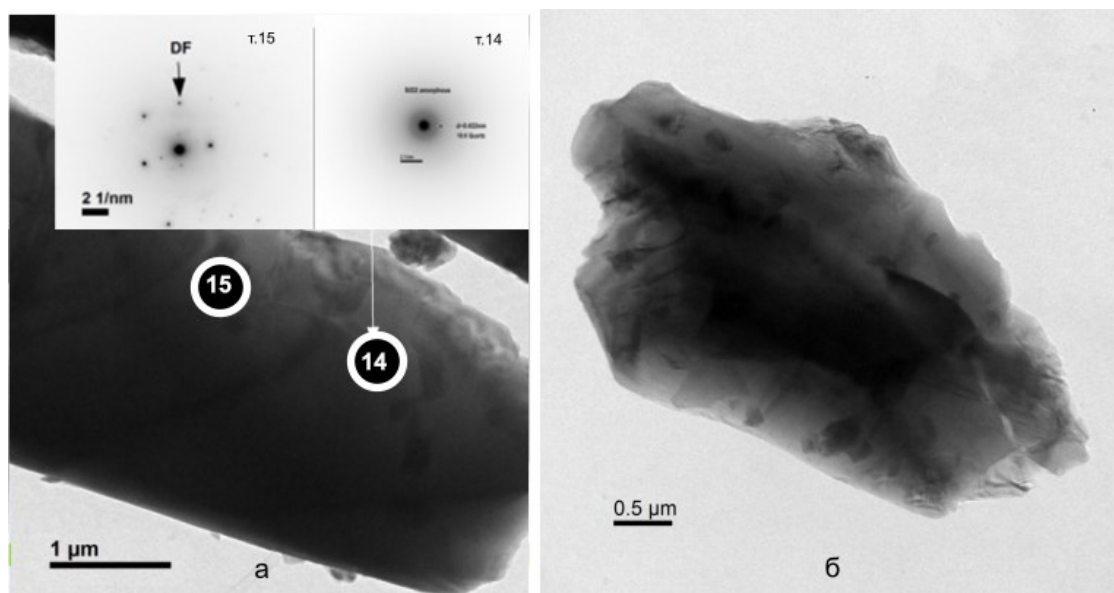


Рис. 2. Микрофотографии, а также дифракционные картины отдельных участков пепловых частиц, выполненных при помощи ПЭМ.

Номерами обозначены проанализированные участки пепловых частиц.

SAED картина дифракции участков этих зерен демонстрирует аморфное (рис. 2а, врезка справа) состояние вещества, однако на фотографиях видно, что сами зерна неоднородны, и в аморфной матрице выделяются темные участки, размеры которых варьируют от сотых долей микрона до нескольких микронов. Эти образования часто имеют кристаллическую структуру (рис. 2а, врезка слева; рис. 3а, врезка слева), которая по параметрам решетки может быть интерпретирована как структура полевого шпата.

Чаще всего в кристаллических участках зерен фиксируется и соответствующий состав фаз (рис. 3а, врезки), однако иногда кристаллическая структура прослеживается в матрице, по составу отвечающей стеклу (рис. 3б, врезки слева). Таким образом, в пепловых частицах фиксируется процесс начала раскристаллизации стекла, прерванный закалкой, в ходе которого могли формироваться метастабильные структуры. По всей вероятности, именно распространенность микрокристов обеспечивает специфику дифрактограмм вулканического пепла, на которых не

регистрируется аморфное вещество. Кроме того, широкий диапазон составов стекол в пепле одного извержения, полученных при помощи микронзондового анализа, может быть объяснен попаданием в фокус электронного пучка микрокристаллов, визуально не различимых в силу своей размерности.

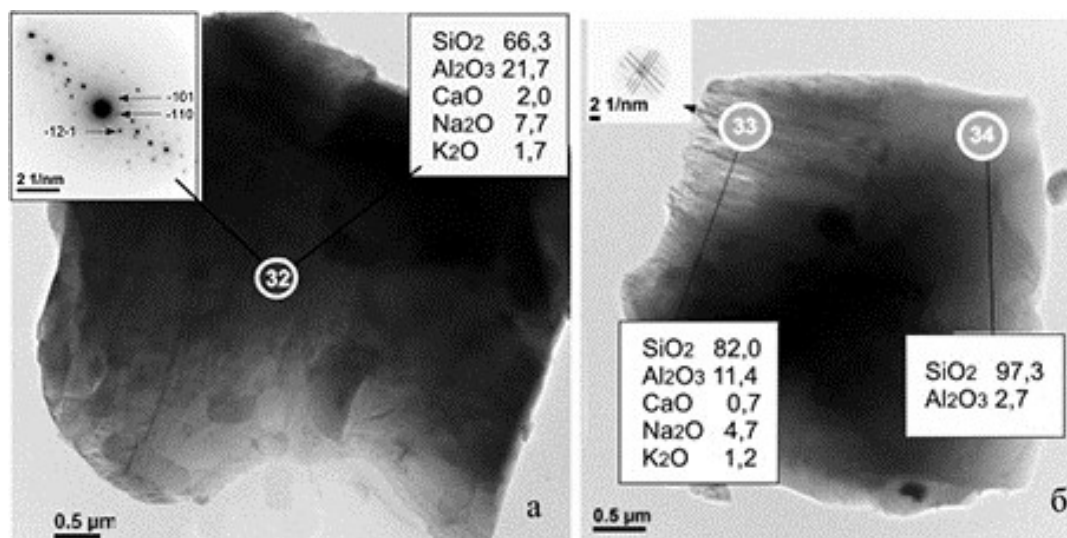


Рис. 3. Микрофотографии, дифракционные картины и составы отдельных участков пепловых частиц, выполненных при помощи ПЭМ.

Номерами обозначены проанализированные участки пепловых частиц.

Таким образом, при помощи исследований микроструктур на просвечивающем микроскопе установлено, что стекловатые частицы пепла («glass shards») сложены не столько стеклом, сколько смесью стекла и микрокристов. Вероятно, суммарный их состав соответствует магматическому расплаву, удаляемому из очага в ходе извержения, однако при точечном анализе этих частиц возможны искажения составных характеристик стекла в связи с попаданием в анализируемый участок минеральных микрозерен. Для получения корректных результатов по составам расплава нужна значительная статистика микронзондовых измерений для нивелировки возможных колебаний составов из-за примеси минералов. Рентгенофазовый анализ в связи со структурными особенностями вещества не может быть использован в количественной диагностике тонких пеплов. Авторы полагают, что закономерности изменения фазового состояния первоначально аморфного вещества, установленные для тонких пеплов вулкана Шивелуч, могут быть характерны и для других подобных вулканических центров.

Работа выполнена в соответствии с Госзаданием ГЕОХИ РАН и ИГЕМ РАН.

### Список литературы

1. Абызов А.М. Рентгенодифракционный анализ поликристаллических веществ на минидифрактометре «Дифрей». СПб: СПбГТИ(ТУ), 2008. 95 с.
2. Толстых М.Л., Мусаэлян Р.Э., Бабанский А.Д. Особенности фазового состава тонкого пепла вулкана Шивелуч // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2023. Вып. 20. С. 669-677. <https://doi.org/10.31241/FNS.2023.20.085>
3. Cashman K.V., Scheu B. Magmatic fragmentation // The encyclopedia of volcanoes. Academic Press, 2015. P. 459-471.
4. Davies S.M. Cryptotephra: the revolution in correlation and precision dating // Journal of Quaternary Science. 2015. V. 30. №. 2. С. 114-130.
5. Gannermann H. Magma Fragmentation // Annual Review Earth Planetary Science. 2015. V. 43. P. 431-458. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-060614-105206>