

Минералого-геохимические особенности тефры островного внутриплитно-океанического вулкана Кумбре-Вьеха (извержение 2021-2022 гг.)

Силаев В.И.¹, Карпов Г.А.², Хазов А.Ф.¹, Игнатьев Г.В.¹, Шанина С.Н.¹, Макеев Б.А.¹, Смолева И.В.¹

Mineralogical and geochemical features of tephra of intraplate oceanic Cumbre Vieja volcano (2021-2022 eruption)

Silaev V.I., Karpov G.A., Khazov A.F., Ignatiev G.V., Shanina S.N., Makeev B.A., Smoleva I.V.

¹ *Институт геологии Коми НЦУрО РАН, г. Сыктывкар;*

e-mail: silaev@geo.komisc.ru

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

Изучена тефра вулкана Кумбре-Вьеха. Данные минералого-геохимических исследований позволяют отнести извержение к типу эксплозивно-эффузивного проявления внутриплитно-океанического плюмового вулканизма.

Извержения вулкана Кумбре-Вьеха на острове Ла Пальма (Испания) в Атлантическом океане (рис. 1а) регистрировались, начиная с XV века, и происходили с периодичностью в 31-237 лет. Активизация вулкана 19 сентября 2021 г. началась с мощных эксплозий пеплов, с последующим излиянием лав (рис. 1б). Это извержение длилось 85 дней и стало рекордным по объему выброса эксплозивного материала и катастрофичным экологическим последствиям – было уничтожено до 3000 построек, осуществлялась массовая эвакуация населения [3]. Выделены три стадии извержения [4]: начальная – предколлапсная, кульминационная – синколлапсная, и постепенного затухания – постколлапсная (рис. 1в).

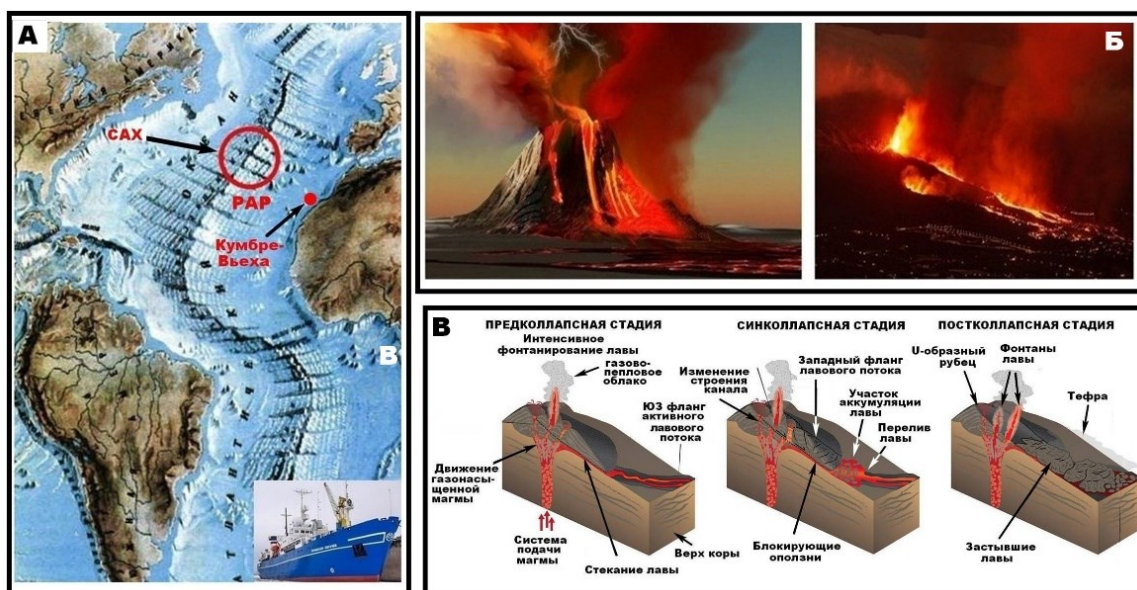


Рис. 1. Вулкан Кумбре-Вьеха: геодинамическая позиция (а), (САХ – Срединно-Атлантический хребет; РАР – Российский разведывательный район в рифтовой зоне САХ), извержение в 2021 г. (б) и модель его стадийности (в) по [4].

Проба тефры была отобрана на начальной стадии извержения немецкими вулканологами (Потсдамский центр имени Гельмгольца – GFZ) и сотрудницей ИВиС ДВО РАН А.В. Шевченко 10.10.2021 г. из горизонта глубиной 7 см.

Материал пробы гранулометрически сильно неоднороден (рис. 2): 1) гравий +3 мм – 12.51 %; 2) гравий -3+2 мм – 7.52 %; 3) песок грубозернистый -2+1 мм – 21.44 %; 4) песок крупнозернистый -1+0.5 мм – 33.74 %; 5) песок среднезернистый -0.5+0.25 мм – 2.44 %; 6) песок мелкозернистый -0.25 мм – 4.35 %. Важная особенность

исследуемых частиц пеплов – высокая степень их везикулярности (рис. 2), что свидетельствует о повышенной газонасыщенности.

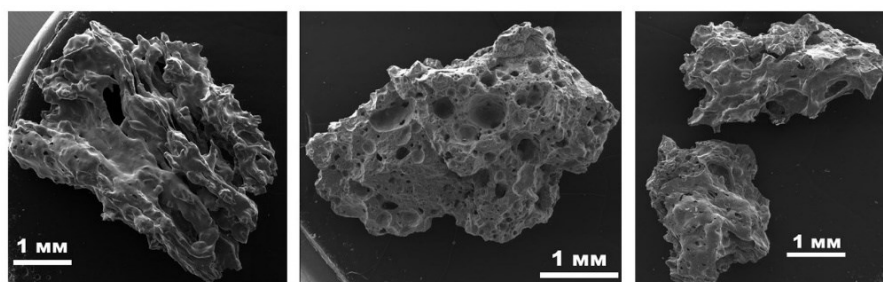


Рис. 2. Типичные частицы гравийных фракций

Химический состав

Тефра с Кумбре-Вьехи имеет следующий химический состав (масс. %): SiO_2 44.22 ± 0.53 ; TiO_2 2.17 ± 0.08 ; ZrO_2 1.57 ± 3.64 ; Al_2O_3 12.28 ± 4.11 ; Fe_2O_3 13.19 ± 0.43 ; Cr_2O_3 0.06 ± 0.014 ; NiO 1.52 ± 3.68 ; CuO 0.03 ± 0.02 ; ZnO 0.03 ± 0.01 ; MnO 0.16 ± 0.01 ; MgO 7.34 ± 0.8 ; CaO 11.32 ± 0.25 ; SrO 0.16 ± 0.01 ; Na_2O 3.87 ± 0.16 ; K_2O 2.1 ± 0.14 ; P_2O_5 0.89 ± 0.08 ; SO_3 0.26 ± 0.14 ; Cl 0.14 ± 0.04 , что соответствует переходу от щелочных пикробазальтов к щелочным базальтам (базанитам). При этом стеклофаза в ней соответствует только щелочным базальтам. В целом же полученные нами по тефре данные достаточно близки к типичному составу лав и шлаков Кумбре-Вьехи, отмеченному итальянскими и испанскими вулканологами [4]. Выявленные особенности химизма исследованных продуктов извержения (пикробазальтов и базальтов) – обогащение магнием и щелочами – типоморфны именно для плюмовых вулканов [1]. По общему химизму они близки к океаническим вулканитам рифтовой зоны Срединно-Атлантического хребта, отличаясь от них лишь сильно повышенной (в 2-3 раза) щелочностью. Наряду с этим, тефра и лавы с Кумбре-Вьехи по химизму принципиально отличаются от тефры и лав островодужных камчатских вулканов, для которых характерны трахи- и нормально-низкощелочные базальты, андезибазальты и андезиты. Таким образом, на диаграмме TAS (рис. 3) можно выделить три основных петрохимических типа: 1) продукты извержения плюмовых вулканов (представители – вулканы Кумбре-Вьеха и Этна); 2) близкие к плюмовым по общему химизму пикробазальты САХ; 3) принципиально отличные от плюмовых и САХ-рифтовых вулканитов продукты извержения островодужных вулканов.

Микроэлементы

В составе исследованной пробы тефры обнаружено 45 микроэлементов, валовое содержание которых достигает 23 333 г/т, что заметно превышает таковое в тефрах островодужных вулканов. По соотношению Nb/La и La/Yb и Th/Yb-Ta/Yb и Hf/3-Th-Ta исследованная нами тефра соответствует средним показателям для вулканитов внутриплитных океанических островов (ОИВ). На треугольной диаграмме Y/15-La/10-Nb/8 она попадает в поле плюмовых вулканов [2].

Индикационной является также лантаноидная геохимия. Тефра Кумбре-Вьехи, по сравнению с пеплами островодужных вулканов, во-первых, характеризуется многократно большей суммарной концентрацией элементов, что типично именно для плюмовых вулканов. А во-вторых, в ней лантаноиды демонстрируют тренд последовательного сокращения хондритнормированных концентраций в направлении от элементов цериевой подгруппы к элементам иттриевой подгруппы (рис. 4), что отражается величиной отношения $\text{La}_N/\text{Yb}_N = 21.8-22.7$. В тефрах островодужных вулканов реализуется субгоризонтальный тренд таких концентраций с $\text{La}_N/\text{Yb}_N = 3-4$.

Особый интерес вызывает факт аномального обогащения исследуемой тефры благородными и платиноидными элементами (преимущественно Pd). Сумма их

валовых содержаний достигает 9.5 г/т, снижаясь в направлении от 10 г/т в гравийных фракциях до 5 г/т в мелкозернистых песках. В части Au валовое содержание изменяется в ряду гранулометрических фракций от 5 до 0.3 г/т, из чего следует, что золото в тейфре Кумбре-Вьехи в основном присутствует в фазово-гетерогенной форме, что вполне сопоставимо с соответствующими оруденениями.

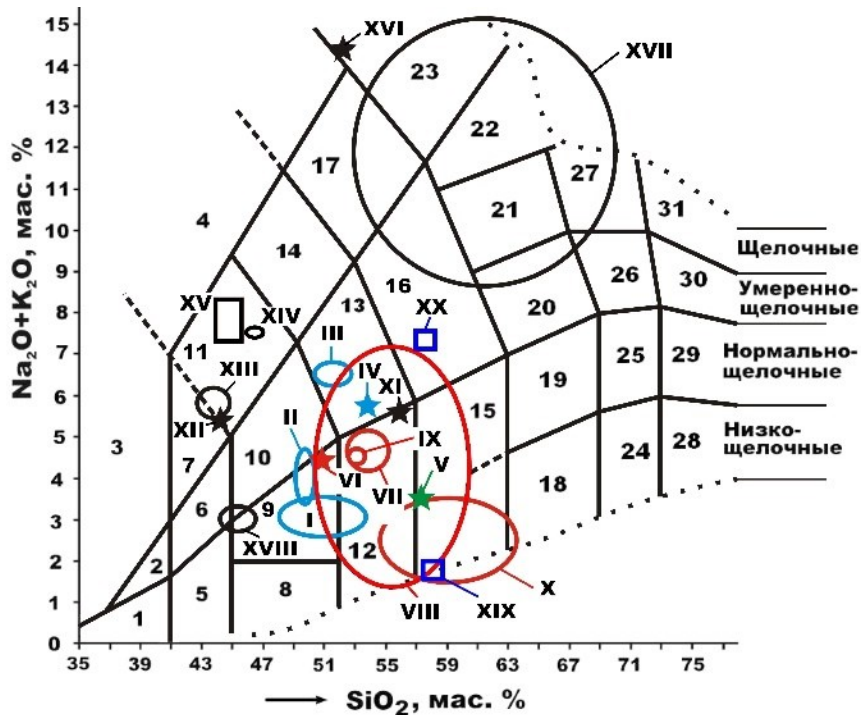


Рис. 3. Диаграмма TAS, иллюстрирующая химизм исследованных пеплов. Поля на диаграмме: от пикритов (1) до риолитов (31). Объекты исследований: I – Толбачик, БТТИ (1975-1976 гг.), лавы; II – Толбачик, БТТИ, алмазосодержащая тейфра; III – Толбачик, ТТИ-50 (2012-2013 гг.), лавы; IV – Толбачик, ТТИ-50, алмазосодержащая тейфра; V – Корякский (2008-2009 гг.), алмазосодержащая тейфра; VI – Ключевской (2009 г.), алмазосодержащая тейфра; VII – Ключевской (кратерное извержение, 2020-2021 гг.), тейфра; VIII – Ключевской (кратерное извержение, 2020-2021 гг.), стеклофаза в тейфре; IX – Ключевской, прорыв Горшкова (2021 г.), лава, шлаки, бомба, тейфра; X – Ключевской, прорыв Горшкова (2021 г.), стеклофаза в лаве, шлаках, бомбе, тейфре; XI – Эйяфьядлайёкюдль, Исландия (2010 г.), тейфра; XII – Этна, Сицилия (1669 г.), тейфра; XIII – Кумбре-Вьеха (2021 г.), тейфра; XIV – Кумбре-Вьеха (2021 г.), стеклофаза в тейфре; XV – Кумбре-Вьеха (2021 г.), шлаки и лава (данные по [4]); XVI – Эребус, Антарктида (2000 г.), тейфра; XVII – Эребус, Антарктида (2000 г.), стеклофаза в тейфре; XVIII – Российский разведочный район в зоне Срединно-Атлантического хребта (отбор в 2019-2020 гг.), лавы, шлаки; XIX, XX – средние составы вулканической стеклофазы, соответственно в фумароле Ядовитой (БТТИ) и из газоконденсатов с прорыва Горшкова.

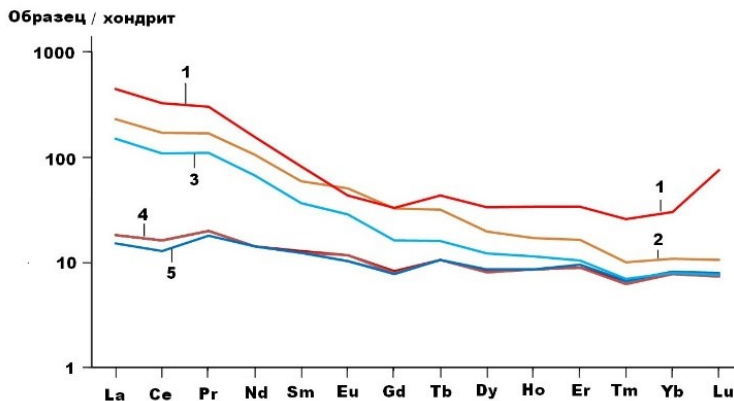


Рис. 4. Хондритнормированные концентрации лантаноидов в вулканических пеплах и тейфрах: 1 – Эребус (2002 г.), 2 – Кумбре-Вьеха (2021 г.), 3 – Этна (1645 г.), 4 – Ключевской (кратерное извержение, 2020-2021 гг.), 5 – Ключевской (прорыв Горшкова, 2021 г.).

Литогенная газовая фаза

Анализ состава литогенной газовой фазы, выделенной нагреванием из исследуемой тефры, привел к следующему результату (мкг/г): H₂ 0.25; CO 9.76; CO₂ 88.95; H₂O 120; CH₄ 0.80; C₂H₄ 21.37; C₂H₆ 0.32; (C₃H₆+C₃H₈) 1.55. Отсюда следует, что состав неорганических компонентов в газовой фазе в целом соответствует пограничной области между коровыми и мантийно-коровыми производными, но при этом характеризуется относительно низким содержанием воды. Состав органических газов отличается преобладанием углеводородов C₂ над суммой C₁+C₃ (ранее еще не отмечавшимся в минералах вулканитов).

Микролиты

В составе тефры диагностированы следующие минералы – *оливин* (преимущественно форстерит), *клинопироксен* (преимущественно диопсид), *амфибол* (актинолит), *плаггиоклазы*, *кварц*, *титаномагнетит*, *хромшпинелид*. Титаномагнетит представляет собой фазово-гомогенные твердые растворы ильменита в магнетите с брутто-формулой $(0.72 \pm 0.09) (\text{Fe}_{0.39-0.96} \text{Mg}_{0.02-0.61} \text{Mn}_{0-0.04} \text{Ni}_{0-0.61}) (\text{Fe}_{0.49-1.68} \text{Al}_{0.16-0.86} \text{Cr}_{0-0.65} \text{V}_{0-0.03})_2 \text{O}_4 + (0.28 \pm 0.09) \text{FeTiO}_3$. Именно такие твердые растворы и характерны для плюмовых вулканов. В частицах тефры обнаружены единичные зерна фазы *никель-медистого самородного железа* $\text{Fe}_{0.63-0.92} \text{Ni}_{0.04-0.05} \text{Cu}_{0.03-0.33}$, *гидроксил-хлориды* состава $(\text{Na}_{0.91-0.96} \text{K}_{0-0.01} \text{Ca}_{0.02-0.04} \text{Fe}_{0.01-0.04}) \text{Cl}_{0.67-0.82} (\text{OH})_{0.26-0.36}$, а также галита и кварца.

Углеродистое вещество

В исследованной тефре установлено дисперсно-рассеянное углеродное вещество (C_{орг} в пределах 0.05-0.1 мас. %). Изотопный состав углерода в этом веществе варьирует в пределах ($\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$, ‰) от -30 до -24 ‰, имея тенденцию к облегчению в направлении от гравийной фракции к песчано-мелкозернистой.

Особенность вулкана Кумбре-Вьеха состоит в том, что он является ярким примером вулканов, функционирующих, в отличие от островодужных вулканов, на субстрате не континентальной, как, например, Камчатка, а океанической коры в результате прорыва к поверхности глубинного вещества мантийного плюма [1]. Данные минералого-геохимических исследований характеризует вулкан Кумбре-Вьеха как типичного представителя внутриплитно-океанических плюмовых вулканов.

Авторы глубоко признательны Алине Викторовне Шевченко (GFZ, ФРГ; ИВиС ДВО РАН) и ее коллегам в Потсдамском центре имени Гельмгольца, ФРГ за пробу тефры, отобранную на вулкане Кумбре-Вьеха и переданную для исследования в Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН.

Список литературы

1. *Грачев А.Ф.* Идентификация мантийных плюмов на основе изучения вещественного состава вулканитов и их изотопно-геохимических характеристик // *Петрология*. 2003. Т. 11. № 6. С. 618-654.
2. *Cabanis B., Lecolle M.* Le diagramme La/10-Y/15-Nb/8: un outil pour la discrimination des series volcaniques et la mise en evidence des processus de melange et/ou de contamination on crustale // *Compte Rendus de l'Académie des Sciences Series II*. 1989. V. 309. P. 2023-2029.
3. *Civico R., Ricci T., Scarlato P. et al.* High-resolution digital surface model of the 2021 eruption deposit of Cumbre Vieja volcano, La Palma, Spain // *Scientific Data*. 2022. № 9. Art. 435. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01551-8>
4. *Romero J., Burton M., Cáceres F. et al.* The initial phase of the 2021 Cumbre Vieja ridge eruption (Canary Islands): Products and dynamics controlling edifice growth and collapse // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2022. V. 431. P. 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2022.107642>