

Особенности фазового состава тонкого пепла вулкана Шивелуч

Толстых М.Л.¹, Мусаэлян Р.Э.², Бабанский А.Д.³

¹ Институт геохимии и неорганической химии им. В.И. Вернадского РАН (ГЕОХИ РАН), Москва

² Институт почвоведения РАН им. В.В. Докучаева, Москва

³ Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, ИГЕМ РАН, Москва

Аннотация. Были изучены тонкие (< 100 мкм) фракции пеплов вулкана Шивелуч извержения 17.11.2014, отобранные в пос. Ключи. Исследование фазового состава пеплов методом рентгенографического анализа показало абсолютное преобладание полевого шпата с незначительной примесью амфибола и кристобалита, в то время как микрозондовый анализ фиксирует наличие в образце частиц, состав которых соответствует риолитовому вулканическому стеклу (SiO_2 – 75–82 %, K_2O – 2.9–3.4 %). Валовой состав пепла (SiO_2 – 66 %, K_2O – 1.5 %), не соответствующий составу смеси минеральных фаз, подтверждает наличие значительной доли риолитового стекла в образце.

Такое расхождение результатов оценки фазового состава пепла может быть объяснено при помощи изучения микроструктур пепловых частиц на просвечивающем микроскопе, которое фиксирует в образце наличие аморфного вещества с микрокристаллами полевого шпата размерностью менее 0.5 мкм.

Ключевые слова: вулканическое стекло, пепел, аморфное вещество.

The features of the phase composition of Shiveluch volcano's fine ash

Tolstykh M.¹, Musaelyan R.², Babanskiy A.³

¹ Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of RAS, Moscow

² V.V. Dokuchaev Soil Science Institute RAS, Moscow

³ Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Biochemistry RAS, Moscow

Abstract. Fine (< 100 microns) particles of ash from the Shiveluch volcano (eruption on November 17, 2014) have been investigated. The study of the ash phase composition by X-ray diffraction showed the absolute predominance of feldspar with a slight admixture of amphibole and cristobalite and amorphous phase,

while microprobe analysis records the presence of particles in the sample whose composition corresponds to rhyolite volcanic glass (SiO_2 – 75–82 %, K_2O – 2.9–3.4 %). The gross composition of ash (SiO_2 – 66 %, K_2O – 1.5 %), which does not correspond to the compositions of the mixture of mineral phases, confirms the presence of a significant proportion of rhyolite glass in the sample.

Such a discrepancy in the results of the ash phase composition assessment can be explained by studying the ash microstructures on a transmission microscope, which fixes an abundance of amorphous substance with feldspar microcrystals of less than 0, 5 μm in the sample.

Keywords: volcanic glass, ash, crystallites, amorphous phases.

Введение

Вулкан Шивелуч, один из крупнейших современных андезитовых вулканов Камчатки, всегда вызывал повышенный интерес исследователей как центр катастрофических извержений с колоссальным объемом изверженного материала. Кроме того, это геологический объект, имеющий уникальные геодинамические характеристики – вулкан Шивелуч приурочен к т.н. «зоне тройного сочленения» - пересечению границ Северо-Американской, Евразийской и Тихоокеанской литосферных плит (Авдейко, 2006; Горбач, 2011 а, б; Толстых, 2015; Nemphtys, 2006, 2008; и др.). История эволюции вулкана – сложный многостадийный процесс с последовательной активизацией нескольких магматических очагов, связанной с мощными сейсмическими событиями, зарегистрированными в разрезе почвенно-пирокластического чехла в виде отложений нескольких обломочных лавин (Певзнер, 2012; Толстых, 2015). Таким образом, вулканический массив Шивелуч можно подразделить на несколько пространственно-временных комплексов: Старый Шивелуч, Байдарный отрог,

Молодой Шивелуч (рис. 1 а). Современная активность вулкана эруптивного центра Молодой Шивелуч – чередование масштабных плининских извержений, слабых выбросов пеплово-газовых облаков и эпизодов активного роста экструзивного купола (Гирина, 2006; Shevchenko, 2015). В голоцене зафиксировано 60 крупных извержений с объемом вулканитов более 1 км³ (Ponomareva, 2007). Столь высокая продуктивность вулкана, вероятно, отражает специфику геодинамических процессов в этом районе. Немаловажно, что, наряду с крупными эксплозиями деятельность вулкана характеризует обилие так называемых слабых выбросов мелкоразмерных пепловых частиц, в результате которых формируются среднеразмерные газопопеловые облака. Количество таких выбросов могло достигать до 80 в год (архив данных Системы мониторинга вулканических извержений KVERT, (<http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/van/index?>), причем объемы изверженного вещества таких выбросов, реконструированные по спутниковым снимкам согласно методу (Prata, 1989; Pavalonis, 2015,) могут быть весьма существенными (Филей, 2019; Бабанский, 2020).

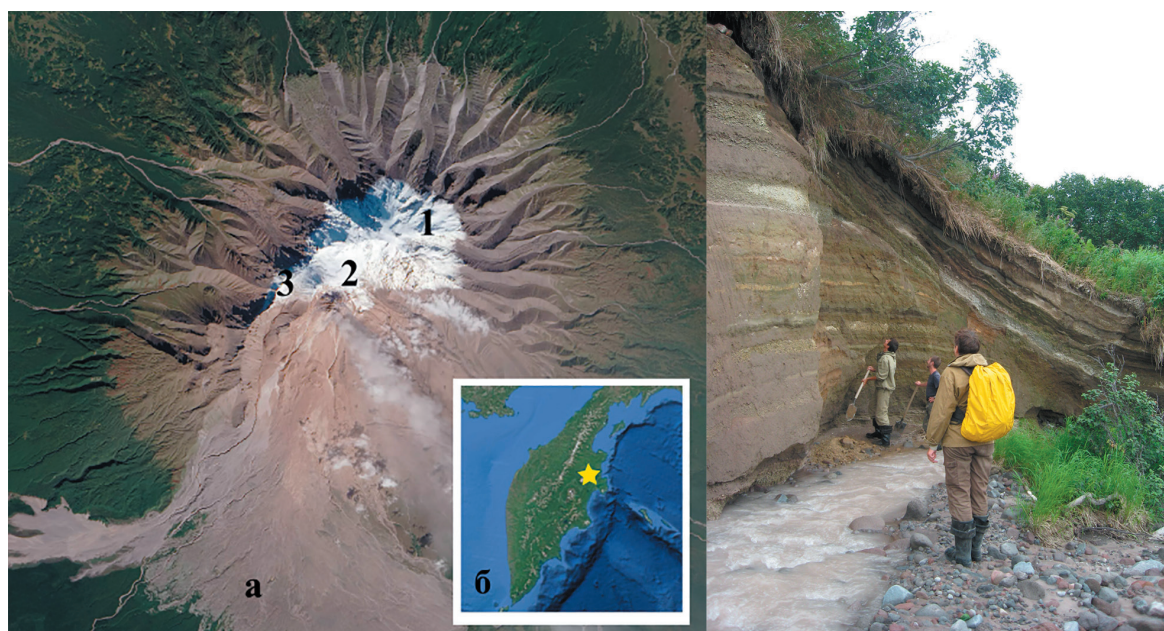


Рис. 1. Вулкан Шивелуч (спутниковый снимок). а – вулканический массив Шивелуч: 1 – Старый, 2 – Молодой Шивелуч, 3 – Байдарный отрог. На врезке б – полуостров Камчатка, звездочкой обозначено местоположение массива Шивелуч. Справа – разрез голоценового почвенно-пирокластического чехла (ППЧ) вулкана Шивелуч; большая часть слоев – тефра или отложения обломочных лавин близ подножия вулкана.

Fig. 1. Shiveluch volcano (satellite image). a – Shiveluch volcanic massif: 1 – Old, 2 – Young Shiveluch, 3 – Baidarny spur. b – the Kamchatka Peninsula, with Shiveluch massif as an asterisk. On right – section of the Holocene soil-pyroclastic cover of the Shiveluch volcano; most of the layers are tephra or avalanche deposits near the foot of the volcano.

Что касается состава лав и тефры, то на протяжении всей истории существования вулкана преобладающим типом продуктов были плагиоклаз-амфиболовые, с незначительным количеством вкрапленников пироксена, андезиты и андезитобазальты (Горбач, 2011). Для средних пород вулкана центра Молодой Шивелуч характерно наличие т.н. мафических анклавов, состоящих, главным образом, из ксеногенного магнезиального оливина, окруженного реакционной каймой (Плечов, 2008; Толстых, 2015).

Показательно, что состав пород не соответствует составу расплавов, выявленному при изучении расплавных включений в разных минералах вкрапленников (Pl, Amph, Crx). Стекло включений как в минералах лав, так и тефры, по составу соответствует дациту и риодациту с высокими содержаниями воды (до 7–8 мас. %) согласно данным SIMS (Humphreys 2006, 2008; Толстых, 2015). Причем состав расплава оставался относительно стабильным в течение всего голоцена и близким к составу стекла основной массы и тонких пеплов дальнего разноса (Portnyagin, Ponomareva, 2019).

Для реконструкции состава магматического очага и уточнения гипотезы о генезисе андезитов Шивелуча (Наумов, 2010) было бы полезно диагностировать состав тонких пеплов, поскольку только пепловые частицы размерностью первые десятки мкм могут быть учтены при реконструкции массы изверженного пепла по космическим снимкам спутника VIIRS Suomi NPP.

Согласно предположениям (Ganneman, 2015), наиболее тонкие фракции пеплов обычно представлены чешуйками вулканического стекла «glass shards». В нашу задачу входила проверка этой гипотезы на примере продуктов извержения вулкана Шивелуч. Причем, поскольку стекла тефры множества извержений вулкана Шивелуч, характеризующиеся стабильностью состава (Portnyagin, Ronomareva, 2019), очень хорошо изучены, корреляция размерности частиц и их состава могла бы использоваться для реконструкции химизма магматической системы.

Методы и результаты исследований

Для изучения был использован пепел извержения 17 ноября 2014 г. отобранный со снега в поселке. Ключи, расположенного в 40 км к юго-западу от центра извержения. При помощи системы сит отсеяны наиболее тонкие частицы (рис. 2, 3). Гранулометрический анализ, который был проведен методом анализа распределения частиц по размерам в суспензиях, эмульсиях и порошках на лазерном анализаторе размеров частиц Microtrac S3500 (серия Bluewave 1) в ЦКП «Функция и свойства почв и почвенного покрова» Почвенного института им. В.В. Докучаева, показал преобладание в пробе частиц около 25 мкм (рис. 2 Б).

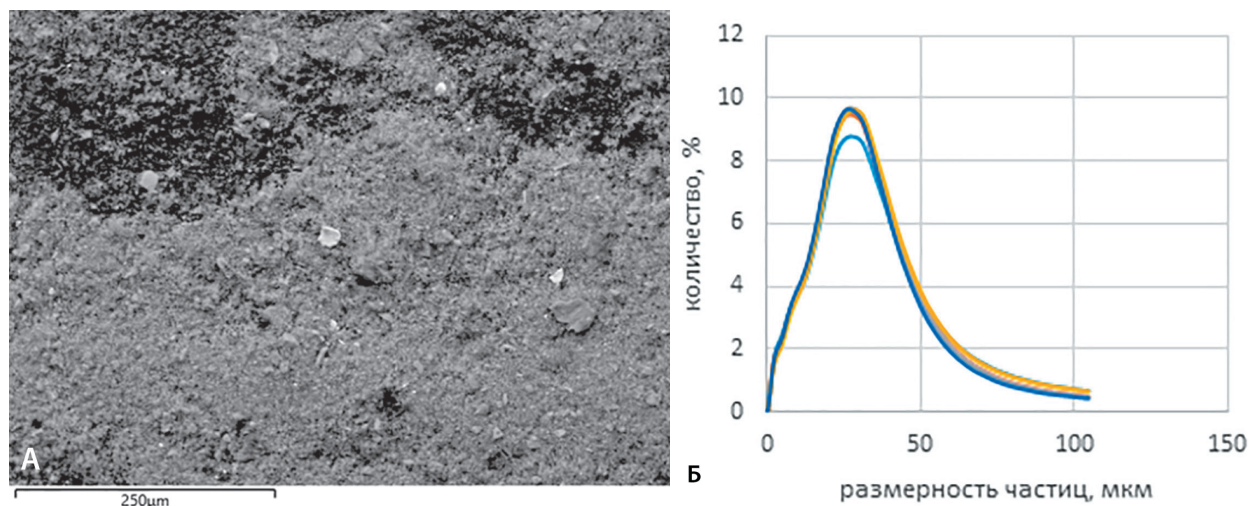


Рис. 2. Наиболее тонкая фракция пепла вулкана Шивелуч. А – фото, сделанное при помощи СЭМ JSM-5610LV. Б – гранулометрический состав пробы.

Fig. 2. The thinnest fraction of Shiveluch volcano ash. A – a photo taken with the help of SEM JSM-5610LV. B – particle size distribution of the sample.

1. Микронзондовый анализ фаз

Частицы пепла были запрессованы в шашку из эпоксидной смолы, отполированы и проанализированы при помощи сканирующего электронного микроскопа JSM-5610LV с энергодисперсионным аналитическим спектрометром AztecOne при ускоряющем напряжении 24 кВ по площадке 1–7 мкм в Лаборатории кристаллохимии минералов ИГЕМ РАН, а также на микроанализаторе JXA-8200 фирмы JEOL (Япония), оборудованным четырьмя кристалл-дифракционными спектрометрами со сменными кристаллами-анализаторами и энергодисперсионным спектрометром фирмы JEOL (ИГЕМ).

Значительная часть пепловых частиц была представлена силикатной фазой широкого диапазона составов кремнекислотности (SiO_2 – 75–82 мас. %, K_2O – 2.9–3.4 мас. %), которую можно интерпретировать только как вулканическое стекло риодацит-риолитового состава, а также плагиоклазом, амфиболом и пироксеном (табл. 1).

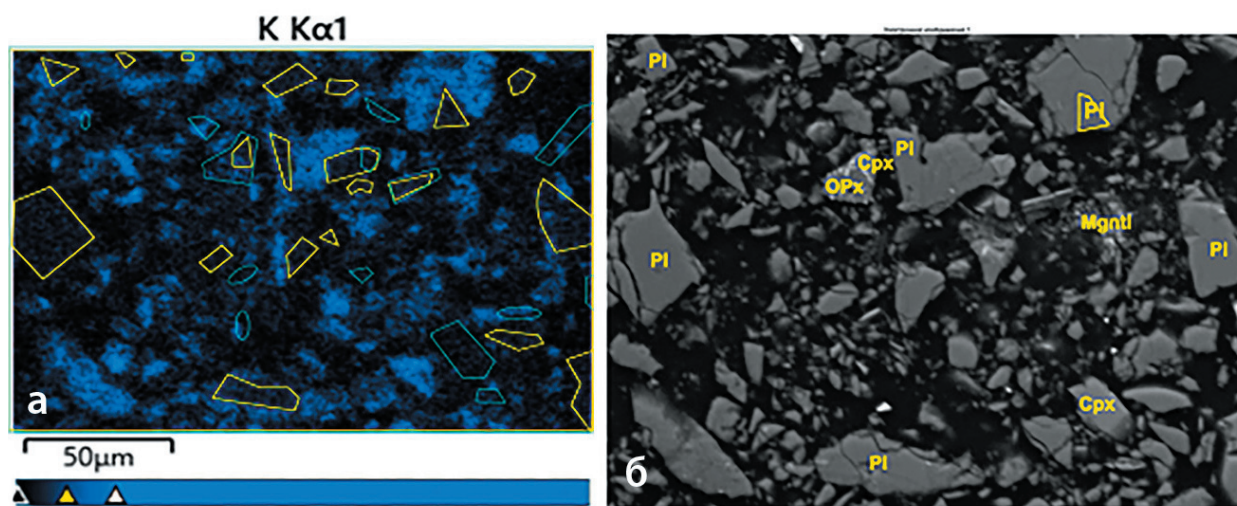


Рис. 3. Фото образца пепла на СЭМ. а – в характеристическом излучении калия, б – в отраженных электронах. На рисунке 3 а – желтой линией обозначены зерна плагиоклаза, зеленой – зерна амфибола.

Fig 3. Photo by SEM of the ash. а – in the characteristic radiation of potassium, б – in reflected electrons. In Fig. 3 а – the yellow line shows plagioclase grains, the green line shows amphibole grains.

Таблица 1. Представительные анализы фаз пепла вулкана Шивелуч извержения 17.11.2014.

Table 1. Representative analyses of ash phases of Shiveluch volcano eruption 17.11.2014.

	1	2	3	4	5	6
SiO ₂	78.58	79.54	79.57	57.79	55.09	47.40
TiO ₂	0.44	0.34	0.36	0.02	0.07	1.83
Al ₂ O ₃	11.37	10.82	10.93	27.36	0.42	7.57
FeO	1.07	1.14	0.85	0.46	16.67	10.57
MnO	0.03	0.04	0.03	0.00	0.98	0.29
MgO	0.06	0.21	0.10	0.06	25.21	16.08
CaO	0.38	0.32	0.43	9.52	0.92	11.10
Na ₂ O	2.01	3.54	3.49	5.91	0.02	1.75
K ₂ O	2.91	3.01	3.43	0.14	0.01	0.31
Сумма	96.85	98.96	99.19	100.06	99.39	96.9

Примечания. 1–3 – стекловатые частицы, 4–6 – плагиоклаз, ортопироксен и амфибол, соответственно. Анализ получен на электронном микроанализаторе JXA-8200 JEOL.

Notes. 1–3 – glass shards, 4–6 – plagioclase, orthopyroxene and amphibole, respectively. Analysis by JXA-8200 JEOL.

К сожалению, четкие представления о доле этой фазы в образце получить довольно сложно. Количественный анализ цифровых изображений в данном случае затруднителен, т.к. между силикатным стеклом и плагиоклазом, основной минеральной фазой пепла (рис. 3 б) слишком мал контраст, даже в характеристическом излучении калия, который является единственным петрогенным элементом, входящим в состав стекла и отсутствующим в минеральных фазах изучаемого парагенезиса.

Можно лишь констатировать, что стекловатых частиц, характеризующихся повышенным содержанием калия (рис. 3 а), гораздо больше, чем минеральных зерен, и эти частицы, в основном, действительно характеризуются размером < 10 мкм, хотя есть и более крупные частицы, выделяющиеся по яркости на карте образца в характеристическом излучении. Однако для того, чтобы получить численные соотношения фаз, необходим иной способ анализа.

Рентгенографический фазовый анализ

Для определения фазового состава вещества был применен рентгенофазовый анализ (РФА) методом внутреннего стандарта (Пущаровский, 2000 и др.) с использованием в качестве стандарта технического корунда согласно методике 191, рекомендованной Научным советом по минералогическим методам исследованиям (Отраслевой реестр..., 2019), с помощью рентгеновского дифрактометра X'Pert PRO MPD (PANalytical, Нидерланды) со следующими параметрами оборудования: монохроматизированное CuK α излучение, режим рентгеновской трубки V 50 kV, I 40 mA, непрерывный режим записи рентгенограмм с шагом 0.02 град. 2 θ , и Rigaku SmartLab SE (Япония), ПО для обработки дифрактограмм SmartLab Studio II при характеристиках оборудования: CuK α 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 результате анализов порошковой (неориентированной) пробы был определен качественный и количественный состав вещества. Согласно дифракционным спектрам, полученным на обоих приборах, в образце преобладают плагиоклазы, кристобалит, присутствуют амфиболы (рис. 4). Количественные показатели фазового состава тонкого пепла таковы: содержание плагиоклазов составляет 84–86 %, кристобалита – 3–4 %, амфиболы – 3–5 %.

Характерно, что на полученных дифрактограммах практически полностью отсутствует размытое гало, характерное для аморфных веществ (Абызов, 2008).

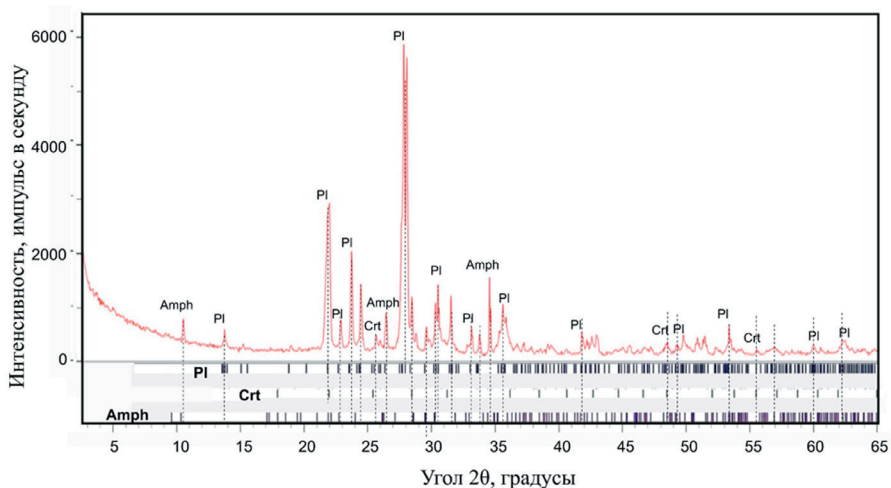


Рис. 4. Дифрактограмма пепла влк. Шивелуч, извержение 17.11.2014. Получена на дифрактометре Rigaku SmartLab SE. Pl – плагиоклаз, Amph – амфибол, Crt – кристобалит.

Fig. 4. Ash diffraction patterns of Shiveluch volcano, 17.11.2014 eruption. Made by Rigaku SmartLab SE. Pl – plagioclase, Amph – amphibole, Crt – cristobalite.

Таким образом, рентгенографическая диагностика показала, что изучаемый пепел представляет собой смесь плагиоклаза, амфибола и кристобалита, причем именно кристаллические фазы составляют более 90 % породы, а наличие и тем более значительные объемы вулканического стекла не были зафиксированы.

2. Спектроскопия комбинационного рассеяния

Анализ пепла на рамановском спектрометре был проведен на спектрометре Senterra (Bruker), Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина (ИФХЭ РАН). Наиболее показателен спектр, полученный при помощи лазера с длиной волны 405 (рис. 5). Согласно интегрированной базе данных рамановских спектров и химического состава минералов RUFF (<https://ruff.info>), на спектре наиболее заметны пики полевых шпатов, амфибола и кристобалита. Незначительные количества аморфной фазы могут быть причиной проявления подобия гало на углах 1000–2000 см⁻¹, хотя пологий пик на этом участке характерен и для модификаций кварца.

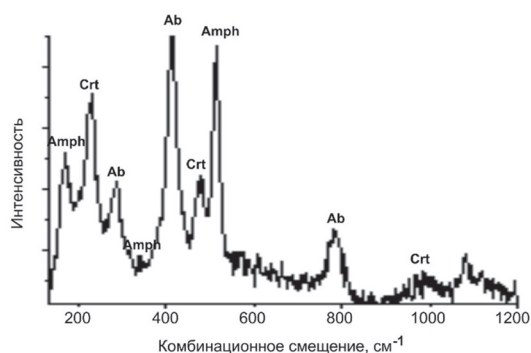


Рис. 5. Спектрограммы для пепла влк. Шивелуч 17.11.2014.

Fig. 5. Raman spectra of the ash of Shiveluch volcano 11.17.2014.

пении PANalytical в ЦКП «ИГЕМ-аналитика» ИГЕМ РАН. Погрешности измерения составили 1–5 % для элементов с концентрациями более 0.5 мас. % и до 12 % для элементов с концентрациями менее 0.5 мас. %.

Тонкий пепел вулкана Шивелуч извержения 17.11.2014 имеет дацитовый состав со сравнительно высокими содержаниями железа и магния:

SiO_2 – 66.21 мас. %; TiO_2 – 0.41 мас. %; Al_2O_3 – 15.5 мас. %; FeO – 3.4 мас. %; MgO – 2.11 мас. %; CaO – 4.3 мас. %; Na_2O – 4.9 мас. %; K_2O – 1.5 мас. %.

При проведении балансового расчета методом наименьших квадратов с учетом усредненного состава стекла и минералов, полученных на микрозонде, получен следующий расчетный фазовый состав породы приведенного выше состава: 53 % стекла риолитового состава, 33 % плагиоклаза, остальное – темноцветные фазы.

Таблица 2. Результаты регрессионного анализа

Table 2. Result of regression analysis

	Коэф.	Станд. ошибка	t-стат.	P-знач.	H 95 %	B 95 %	H 95.0 %	B 95.0 %
Y-пер.	0.3961	0.4325	0.9159	0.4115	-0.8046	1.5968	-0.8046	1.5968
X 1	0.5335	0.0484	11.0231	0.0004	0.3991	0.6678	0.3991	0.6678
X 2	0.3345	0.0654	5.1151	0.0069	0.1529	0.5161	0.1529	0.5161
X 3	0.0834	0.0852	0.9796	0.3827	-0.1530	0.3198	-0.1530	0.3198
X 4	0.0057	0.1271	0.0445	0.9666	-0.3473	0.3587	-0.3473	0.3587

Примечание. X 1 – стекло, X 2 – плагиоклаз, X 3 – ортопироксен, X 4 – амфибол.

Notes. X 1 – glass, X 2 – plagioclase, X 3 – orthopyroxene, X 4 – amphibole.

Поскольку карты элементов (рис. 3) демонстрируют преобладание калий-содержащих фаз среди частиц наиболее мелкой (менее 20 мкм) размерности, можно предполагать, что наиболее тонкие фракции пеплов сложены именно стеклом риодацит-риолитового состава. Однако для того, чтобы доказать аморфную природу этой силикатной калийсодержащей фазы, потребовалось использовать метод просвечивающей микроскопии.

Просвечивающая электронная микроскопия

Исследование проводилось с использованием 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 мм² (Оксфорд) (в сочетании с программным обеспечением AZtecTEM). Оцифрованные изображения были записаны камерами Gatan Orius C200D1. Анализ ЭДС спектров микрочастиц проводили с использованием ускоряющего напряжения 200 кВ и более высокого тока пучка при небольшом размере зонда ($\approx 0.15 \mu\text{m}$). Набор спектров длился в течение 40–60 секунд.

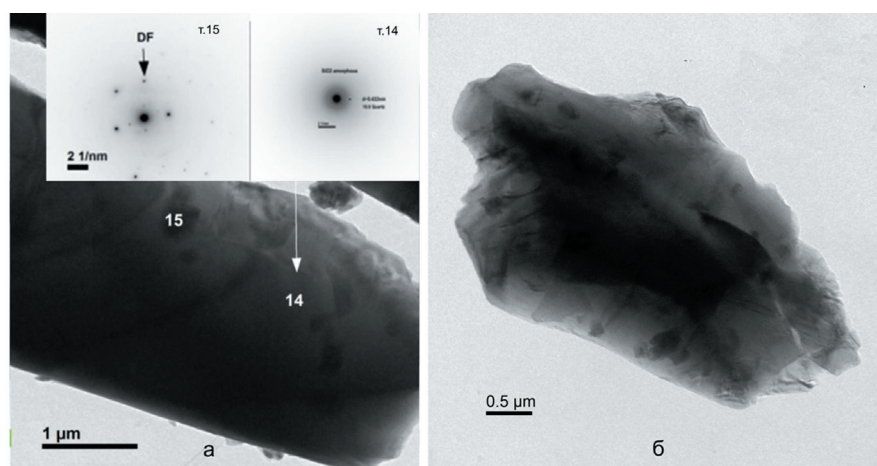


Рис. 6. Снимки отдельных зерен пепла после истирания, сделанные с помощью ПЭМ. На врезках – дифракционные картины участков зерен, отмеченных номерами. т. 14 – аморфное вещество (стекло), т. 15 – микрокристалл плагиоклаза.

Fig. 6. Pictures of individual ash grains after grinding taken with TEM. On the insets – diffraction patterns of grain sections marked with numbers. т. 14 – X-ray amorphous substance (glass), т. 15 – microcrystal plagioclase.

С помощью комплекса методов просвечивающей микроскопии были изучены пеплы, предварительно истертые до порошка размерностью до 10 мкм. Наряду с фотографиями с чрезвычайно большим разрешением (рис. 6) были получены дифракционные картины для различных участков зерен, а также анализ вещества в точке. Выяснилось, зерна представлены иногда плагиоклазом и амфиболом, но чаще аморфным веществом (стеклом), состав которого соответствует риолиту (SiO_2 – 79–83 мас. %, Al_2O_3 – 10–13 %, сумма щелочей – 5–6 %). Однако это вещество неоднородно (рис. 6). В нем содержатся микрокристаллы плагиоклаза, диагностируемые как по дифракционной картине, так и по химическому составу. Размерность этих микрокристаллов (0.1–0.5 мкм) вполне соответствует нижней границе размерности кристаллических фаз, диагностируемых при помощи дифрактометра X'Pert. Таким образом, вероятно, именно благодаря этим микровключениям вещество пеплов рентгенографически характеризуется как преимущественно кристаллическое.

Обсуждение результатов исследования и выводы

Итак, компиляция результатов различных аналитических методов, определяющих химический состав вещества, продемонстрировала следующие характеристики тонкой фракции пепла вулкана Шивелуч извержения 17.11.2014: валовой дацитовый состав пепла обусловлен сочетанием мелкозернистых частиц риолитового стекла (более 50 % массы образца) и зерен и обломков зерен плагиоклаза, ортопироксена, амфибола и кристобалита.

Риолитовое стекло не является гомогенным и содержит множественные включения кристаллических зерен (чаще всего, плагиоклаза, реже кварца) размерностью от сотых до десятых долей микрона. Вероятно, кристаллизация этих минеральных фаз могла происходить уже в процессе извержения, и совокупность стекла и этих кристаллических фаз может характеризовать состав остаточного расплава в магматическом очаге.

Частицы стекла, а, точнее, остаточного стекла и микролитов, действительно составляют большую часть самой тонкой фракции пепловых частиц (до 20 мкм), однако встречаются и более крупные стекловатые выделения; кроме того, обломки кристаллов вкрапленников и кристаллы микролитов основной массы тоже встречаются среди зерен этой размерности. Следовательно, абсолютно четкой корреляции между размерностью частиц и их фазовым составом не прослеживается.

На наш взгляд, оптимальным методом оценки фазового состава пеплов можно считать комбинацию валового состава пепла и составов минеральных фаз и стекла, полученных при помощи микронного анализа, в то время как рентгенографические методы определения фазового состава дают искаженную картину фазовых соотношений в вулканическом пепле.

Благодарности

Работа выполнена в соответствии с Государственным заданием ГЕОХИ РАН.

Литература

1. Абызов А.М. Рентгенодифракционный анализ поликристаллических веществ на минидифрактометре «Дифрей» // СПб: СПбГТИ(ТУ). 2008. 95 с.
2. Авдейко Г.П., Палуева А.А., Хлебородова О.А. Геодинамические условия вулканизма и магмообразования Курило-Камчатской островодужной системы // Петрология. 2006. Т. 14. № 3. С. 249–267.
3. Бабанский А.Д., Толстых М.Л., Мельников Д.В. Характеристики тонких пеплов вулкана Шивелуч // Сб. «Породо-, минерало- и рудообразование: достижения и перспективы исследований. Труды к 90-летию ИГЕМ РАН». 2020. С. 284–288.
4. Гирина О.А., Демянчук Ю.В., Мельников Д.В., Ушаков С.В., Овсянников А.А., Сокоренко А.В. Пароксизмальная фаза извержения вулкана Молодой Шивелуч, Камчатка, 27 февраля 2005 г. (предварительное сообщение) // Вулканология и сейсмология. 2006. № 1. С. 16–23.
5. Горбач Н.В., Портнягин М.В. Геологическое строение и петрология лавового комплекса вулкана Молодой Шивелуч // Петрология. 2011. Т. 19. № 2 С. 140–172.
6. Горбач Н.В. Вулкан Старый Шивелуч: геологическое строение, реконструкция эруптивных центров и характер деятельности в позднем плейстоцене // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2011. Вып. 17 № 1. С. 77–90.
7. Наумов В.Б., Коваленко В.И., Бабанский А.Д., Толстых М.Л. Генезис андезитов по данным изучения расплавных включений в минералах // Петрология. 1997. Т. 5. С. 654–665.
8. Отраслевой реестр методик анализа, допущенных (рекомендованных) к применению при лабораторно-аналитическом обеспечении ГРП на ТПИ // Федеральное агентство по недропользованию. М.: 2019. https://vims-geo.ru/ru/documents/76/reestr_metodik_06_2019.pdf.
9. Певзнер М.М., Бабанский А.Д., Толстых М.Л., Кононкова Н.Н. Перестройка магматической системы вулканического массива Шивелуч как следствие крупномасштабных обрушений его постройки в позднем плейстоцене – раннем голоцене // ДАН. 2012. Т. 437. № 3. С. 318–321.
10. Плечов П. Ю. и др. Эволюция состава расплава при внедрении базальтов в кислый магматический очаг // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2008. №. 4. С. 35–44. DOI: 10.1134/S0203030618049965.
11. Пушаровский Д.Ю. Рентгенография минералов // Геоинформмарк. М. 2000. 292 с.
12. Толстых М.Л., Певзнер М.М., Наумов В.Б., Бабанский А.Д., Кононкова Н.Н. Типы расплавов, формировавших пирокластические породы различных структурно-возрастных комплексов вулканического массива Шивелуч (Камчатка) по данным изучения включений в минералах // Петрология. 2015. Т. 23. № 5. С. 521–558. DOI:10.7868/S0869590315040056.
13. Филей А.А. Автоматическое обнаружение вулканического пепла по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 4. С. 63–73. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-63-73.
14. Gannermann H. Magma Fragmentation // Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 2015. V. 43. P. 431–458.
15. Humphreys M. C. S., Blundy J. D., Sparks R.S.J. Magma Evolution and Open-System Processes at Shiveluch Volcano: Insights from Phenocryst Zoning // Journal of Petrology. 2006. V.47. P. 2303–2334.
16. 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.
17. Pavlonis M. J., Heidinger A. K., Sieglaff J. Automated retrievals of volcanic ash and dust cloud properties from upwelling infrared measurements // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2013. V. 118. No 3. P. 1436–1458. DOI: 10.1002/jgrd.50173.
18. Ponomareva V.V., Kyle P., Pevzner M.M., Sulerzhitsky L.D. and Hartman M. Holocene Eruptive History of Shiveluch Volcano, Kamchatka Peninsula, Russia // Volcanism and Subduction: The Kamchatka region. Eichelberger J., Gordeev E., Izbekov P., Lees J. Eds), AGU Geophysical Monograph, 2007. V. 172. P. 263–282.
19. Rietveld H. M. The Rietveld method. Phys. Scr. 2014. V. 89 (9). P. 098002. DOI: 10.1088/0031-8949/89/9/098002.
20. Prata A.J. Observation of volcanic ash clouds in the 10–12 micron window using AVHRR/2 Data // Intern. J. Remote Sensing. 1989. V. 10. No 4–5. P. 751–761.
21. Portnyagin M.V., Ponomareva V.V., Zelenin E.A., Bazanova L.I., Plechova A.A., Rogozin A.N., Garbe-Schonberg D. TephraKam: Geochemical database of glass composition in tephra and welded tuffs from the Kamchatka volcanic arc (NW Pacific) // Earth Syst. Sci. Data Discuss. 2019. V. 12. No 1. P. 469–486. 10.13140/RG.2.2.23627.13606.

22. Rietveld H. M. The Rietveld method. *Phys. Scr.* 2014. V. 89. No 9. P. 098002. DOI: 10.1088/0031-8949/89/9/098002.
23. Shevchenko A.V., Dvigalo V.N., SviridI. Yu. Airborne photogrammetry and geomorphological analysis of the 2001-2012 exogenous dome growth at Molodoy Shiveluch Volcano, Kamchatka // *J. of Volcanology and Geothermal Research*. 2015. V. 304. P. 94–107. doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.08.013.