

УДК 550.442:553.8:552.323

ТЕФРА С ОСТРОВНОГО ВНУТРИПЛИТНО-ОКЕАНИЧЕСКОГО ВУЛКАНА КУМБРЕ-ВЬЯХА (ИЗВЕРЖЕНИЕ 2021 г.)

© 2023 г. В. И. Силаев^а, *, Г. А. Карпов^б, **, А. С. Шуйский^а, А. Ф. Хазов^а, Г. В. Игнатьев^а,
С. Н. Шанина^а, Б. А. Макеев^а, И. В. Смолева^а, Д. В. Киселёва^с

^аИнститут геологии Коми НЦ УрО РАН, ул. Первомайская, 54, Сыктывкар, 167982 Россия

^бИнститут вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, бульвар Пийна, 9, Петропавловск-Камчатский, 683006 Россия

^сИнститут геологии и геохимии УрО РАН, ул. Вонсовского, 15, Екатеринбург, 620016 Россия

*e-mail: silaev@geo.komisc.ru

**e-mail: karpovga@kscnet.ru

Поступила в редакцию 13.02.2023 г.

После доработки 08.04.2023 г.

Принята к публикации 27.06.2023 г.

Проведены комплексные минералого-геохимические исследования представительной пробы тефры с вулкана Кумбре-Вьяха (извержение 2020–2021 гг.), имеющей гравийно-псаммитовый гранулометрический состав, и характеризующейся аномально высокой степенью везикулярности частиц. По валовому химическому составу эта тефра соответствует переходу от щелочных пикробазальтов к щелочным базальтам, принципиально отличаясь от пеплов тефры окраинно-континентальных вулканов. В составе исследованной тефры обнаружено 45 микроэлементов с валовым содержанием до 2333 г/т, что превышает таковое в тефрах островодужных вулканов. По соотношению геохимических критериев тефра с вулкана Кумбре-Вьяха соответствует средним показателям для внутриплитных вулканов в океанах. Геохимической особенностью изученной тефры является сильное обогащение лантаноидами, благородными и платиноидными металлами. В составе литогенной газовой фазы, выделенной нагреванием из исследуемой тефры, установлены H_2 , CO , CO_2 , H_2O , CH_4 , C_2H_4 , C_2H_6 , C_3H_6 , C_3H_8 . Пропорции между неорганическими компонентами в газовой фазе в целом соответствуют пограничной области между коровыми и мантийно-коровыми производными, но при этом обнаруживается относительно низкое содержание воды. В составе микролитов выявлены и изучены оливин состава Fe_{73-84} , существенно диопсидовый клинопироксен, плагиоклазы состава андезин-битовнит, хромшпинелиды, фазово-гомогенные твердые растворы ильменита в магнетите, фазы Ni-Cu-содержащего самородного железа, кварц, натриевые гидроксил-хлориды. Кроме того, в тефре вулкана Кумбре-Вьяха обнаружено дисперсно-рассеянное углеродное вещество с изотопным составом углерода $\delta^{13}C_{PDB} = -30...-24\%$, что соответствует изотопному составу углерода в абиогенных углеродных веществах вулканогенного происхождения. Вся совокупность результатов минералого-геохимических исследований характеризует вулкан Кумбре-Вьяха как типичного представителя внутриплитно-океанических плюмовых вулканов.

Ключевые слова: плюмовые вулканы, Кумбре-Вьяха (2020–2021 гг.), химизм, микроэлементы, литогенная газовая фаза, микролиты, абиогенное углеродное вещество

DOI: 10.31857/S0203030623700268, **EDN:** WERUSL

ВВЕДЕНИЕ

Зарегистрированные извержения вулкана Кумбре-Вьяха на о. Ла Пальма (Испания) в Атлантическом океане (рис. 1а) происходили, начиная с XV века, с периодичностью от 31 до 237 лет. Последняя активизация произошла 19 сентября 2020 г., начавшись мощными выбросами пеплов и излиянием лав (см. рис. 1б). Достигнув максимума в ноябре, и постепенно затухая, извержение закончилось внезапно 25 января 2021 г. Оно стало рекордным по объему эксплозивного (пеплового) материала и катастрофичным по экологическим

последствиям – было уничтожено до 3000 построек, осуществлялась массовая эвакуация населения [Cívico et al., 2022].

Историю последнего извержения подразделяют на три стадии [Romero et al., 2022]: зарождения – предколлапсную, кульминации – синколлапсную и постепенного затухания – постколлапсную (см. рис. 1в). Особенностью вулкана Кумбре-Вьяха состоит в том, что он является ярким примером вулканов, функционирующих, в отличие от островодужных, на субстрате не континентальной [Гордеев, Бергаль-Кувикас, 2022; Гордеев, Кар-

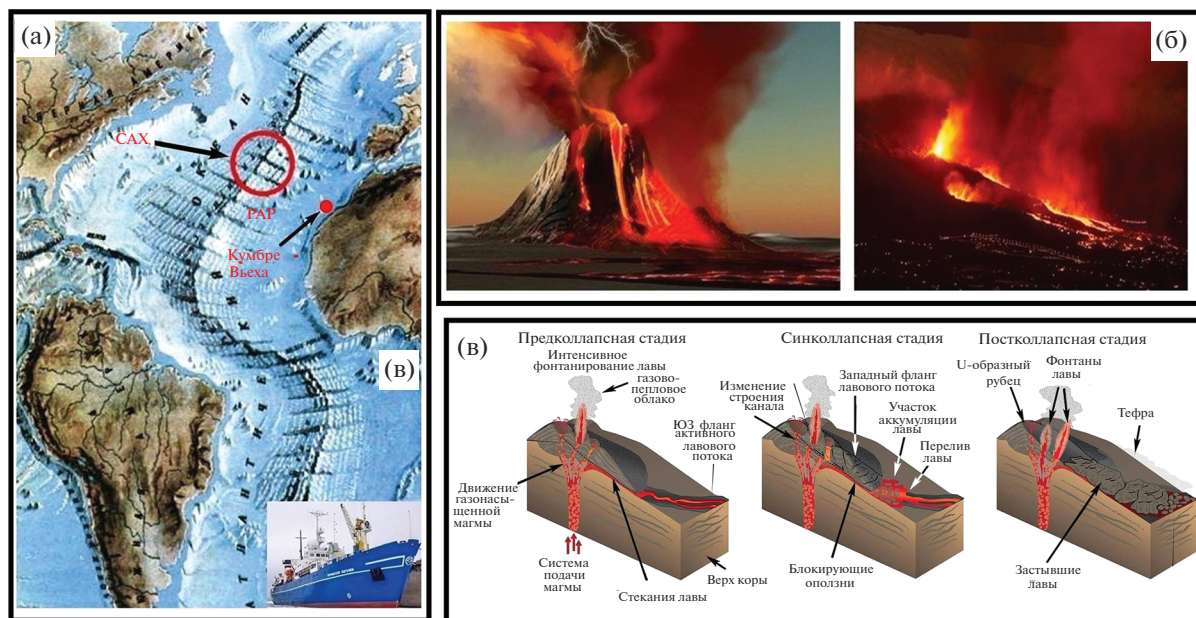


Рис. 1. Вулкан Кумбре-Вьяха.

а – геодинамическая позиция, САХ – Срединно-Атлантический хребет; РАР – Российский разведывательный район в рифтовой зоне САХ; б – извержение 2021 г.; в – модель стадийности извержения Кумбре-Вьяха, по [Romero et al., 2022].

пов, 2022], а океанической коры в результате прорыва к поверхности глубинного вещества вследствие так называемых мантийных плюмов [Соболев, Никогонесян, 1994; Салтыковский, Титаева, 1998; Грачев, 2003; Чернышева, Ерошенко, 2019].

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Проба тефры извержения Кумбре-Вьяха–2021 г. была отобрана 10.10.2021 г. в период первой, наиболее мощной стадии извержения из горизонта толщиной 7 см в точке с координатами $28^{\circ}37'26.32''$ с.ш. и $17^{\circ}53'4.45''$ з.д. Общий вес отобранной пробы составил 147.7 г. Нам на исследование была передана часть этой пробы весом 17.222 г. Полученный материал гранулометрически оказался сильно неоднородным, распределяясь по фракциям следующим образом (рис. 2): 1) гравий +3 мм – 2.155 г (12.51%); 2) гравий –3 + 2 мм – 1.295 г (7.52%); 3) песок грубозернистый –2 +1 мм – 3.693 г (21.44%); 4) песок крупнозернистый –1 + 0.5 мм – 5.812 г (33.74%); 5) песок среднезернистый –0.5 + 0.25 мм – 3.521 г (2.44%); 6) песок мелкозернистый –0.25 мм – 0.746 г (4.35%). Пропорция между гравийными и песчаными фракциями составила 0.25 (см. рис. 2). В ходе исследования были использованы следующие аналитические методы: термический анализ (DTG-60A/60 AH Shimadzu); рентгеновская дифрактометрия (Shimadzu XRD-6000); сканирующая электронная микроскопия (JSM-6400 с ЭД и волновым спектрометра-

ми); масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой (Agilent 7700x); рентгенофлуоресцентный анализ (Shimadzu XRF-1800); определение валового содержания углерода методом кулонометрического титрования по величине рН (Ан-7529М); изотопная спектрометрия углерода (Delta V+ (Finnigan) с элементным анализатором Flash EA-NT 1112 и газовым коммутатором Confo IV); изотопная спектрометрия стронция и неодима (Triton Plus Thermo Fisher Scientific); газовая хроматография (“Цвет-800” с пиролитической приставкой).

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Во всех гранулометрических фракциях исследованной пробы морфология частиц заметно отклоняется от изометричности, но в разной степени (коэффициент удлинения частиц: среднее \pm СКО, в скобках – коэффициент вариации в %): *гравий* +3 мм = 1.47 ± 0.36 (24); *гравий* –3 + 2 мм = 1.85 ± 0.49 (26); *песок грубозернистый* = 2.08 ± 0.7 (34); *песок крупнозернистый* = 2.22 ± 0.75 (34); *песок среднезернистый* = 1.76 ± 0.56 (32); *песок мелкозернистый* = 2.28 ± 0.79 (35%). Таким образом, степень удлинения частиц в ряду гранулометрических фракций последовательно увеличивается в направлении от гравия +3 мм до крупнозернистого песка, а затем скачкообразно возрастает до максимума в мелкозернистом песке. При этом в преде-

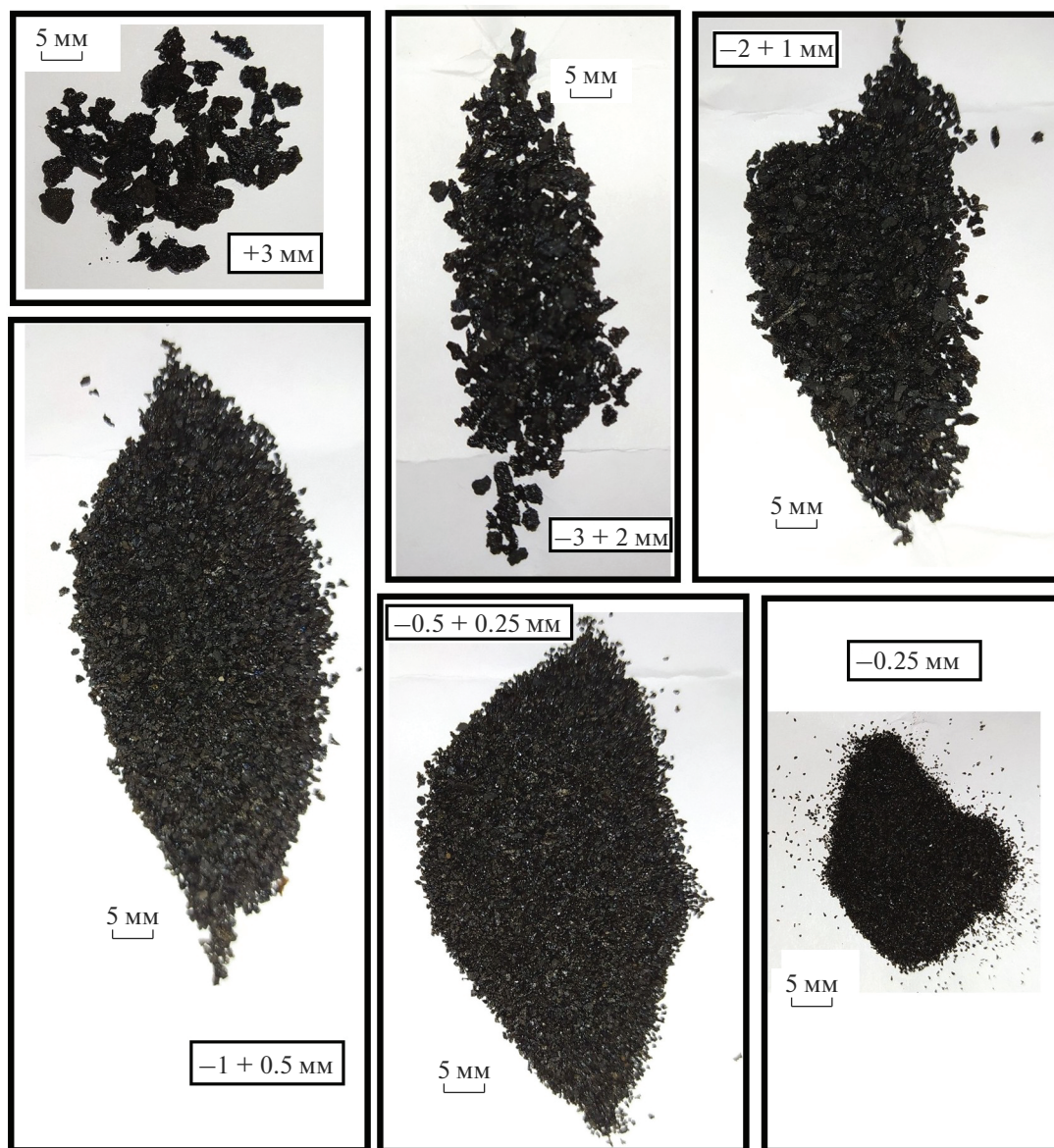


Рис. 2. Гранулометрические фракции в исследованном образце тефры с вулкана Кумбре-Вьяха.

лах отдельных фракций степень удлинения колеблется весьма умеренно — коэффициенты вариации лежат в пределах 24–35%.

Важная особенность частиц в исследуемой тефре — высокая степень их везикулярности (рис. 3, 4), явно превышающая таковую в частицах пеплов и тефр островодужных вулканов. Это свидетельствует о повышенной газонасыщенности пеплов Кумбре-Вьяха. Везикулы имеют в основном овальную форму с незначительным варьированием по размерам. В *гравийных* частицах размеры везикул лежат статистически в пределах $(162 \pm 140) \times (98 \pm 83)$ мкм с коэффициентом удлинения 1.67 ± 0.54 . Коэффициент корреляции между длиной и шириной составляет 0.86. В *песчаных* части-

цах те же параметры составляют $(156 \pm 146) \times (105 \pm 113)$ мкм, 1.57 ± 0.64 и 0.94. Следовательно, устанавливается практически тождественность параметров везикулярности в частицах гравийных и псаммитовых фракций, что указывает на генетическую однородность исследованного материала.

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ

Исследованная нами тефра имеет следующий валовый химический состав (мас. %): 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 ;

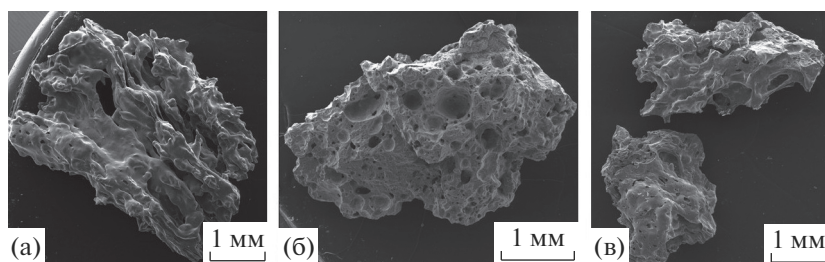


Рис. 3. Облик типичных частиц гравийных фракций.

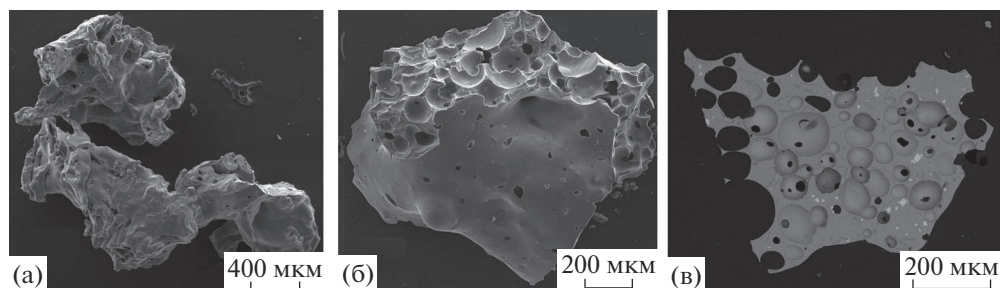


Рис. 4. Облик типичных частиц песчаных фракций.

MnO 0.16 ± 0.01 ; MgO 7.34 ± 0.8 ; CaO 11.32 ± 0.25 ; SrO 0.16 ± 0.01 ; Na₂O 3.87 ± 0.16 ; K₂O 2.1 ± 0.14 ; P₂O₅ 0.89 ± 0.08 ; SO₃ 0.26 ± 0.14 ; Cl 0.14 ± 0.04 . Преобладающая в частицах тефры стеклофаза отличается несколько большей кремнеземистостью, глиноземистостью и щелочностью, но более низкой магниальностью, железистостью и известковистостью. Очевидно, что это обусловлено разницей химического состава вулканического стекла и содержащихся в нём микролитов, влияющих на валовый состав тефры.

В рамках петрохимической номенклатуры (рис. 5) исследованная тефра соответствует переходу от щелочных пикробазальтов к щелочным базальтам (базанитам). При этом стеклофаза в ней соответствует только щелочным базальтам. Полученные нами данные по тефре достаточно близки к таковым для лав и шлаков вулкана Кумбре-Вьяха, изученных другими исследователями [Romero et al., 2022]. Следует подчеркнуть, что выявленные особенности химизма исследованных продуктов извержения — пикробазальты и базальты, обогащенные магнием и щелочами — типоморфны именно для плюмовых вулканов [Грачев, 2003]. По общему химизму вулканы Кумбре-Вьяха близки к океаническим вулканикам рифтовой зоны Срединно-Атлантического хребта, отличаясь от последних лишь сильно повышенной (в 2–3 раза) щелочностью. Наряду с этим вулканы Кумбре-Вьяха по химическому составу принципиально отличаются от тефр, шлаков и лав островодужных камчатских вулканов, кото-

рые соответствуют трахи- и нормально-низкощелочным базальтам, андезибазальтам и андезитам.

Таким образом, с учетом результатов наших предыдущих исследований [Карпов и др., 2017; Силаев и др., 2019а, 2019б, 2020, 2021] современные вулканы можно подразделить на три основных типа (см. рис. 5): 1) продукты извержения плюмовых вулканов — Кумбре-Вьяха и Этна; 2) близкие к плюмовым по общему химизму пикробазальты САХ; 3) принципиально отличные от плюмовых и САХ-рифтовых вулкаников продукты извержения островодужных вулканов. Некоторым исключением из приведенного ряда выглядит изученная нами тефра с вулкана Эребус, отличающаяся кислотностью и аномально высокой щелочностью (фонолиты). Но и в этом случае можно увидеть результат эволюции продуктов извержения скорее плюмовых, чем островодужных вулканов [Giehl et al., 2013].

МИКРОЭЛЕМЕНТЫ

В составе исследованной нами тефры обнаружено 45 микроэлементов (табл. 1), валовое содержание которых достигает 2333.3 г/т, что заметно превышает таковое в тефрах островодужных вулканов. В ряду гранулометрических фракций тефры Кумбре-Вьяха в направлении от гравийной к псаммо-мелкозернистой валовое содержание микроэлементов сокращается примерно на 5%. С позиций Ю.Г. Щербакова [1976] выявленная в тефре ассоциация микроэлементов демонстрирует

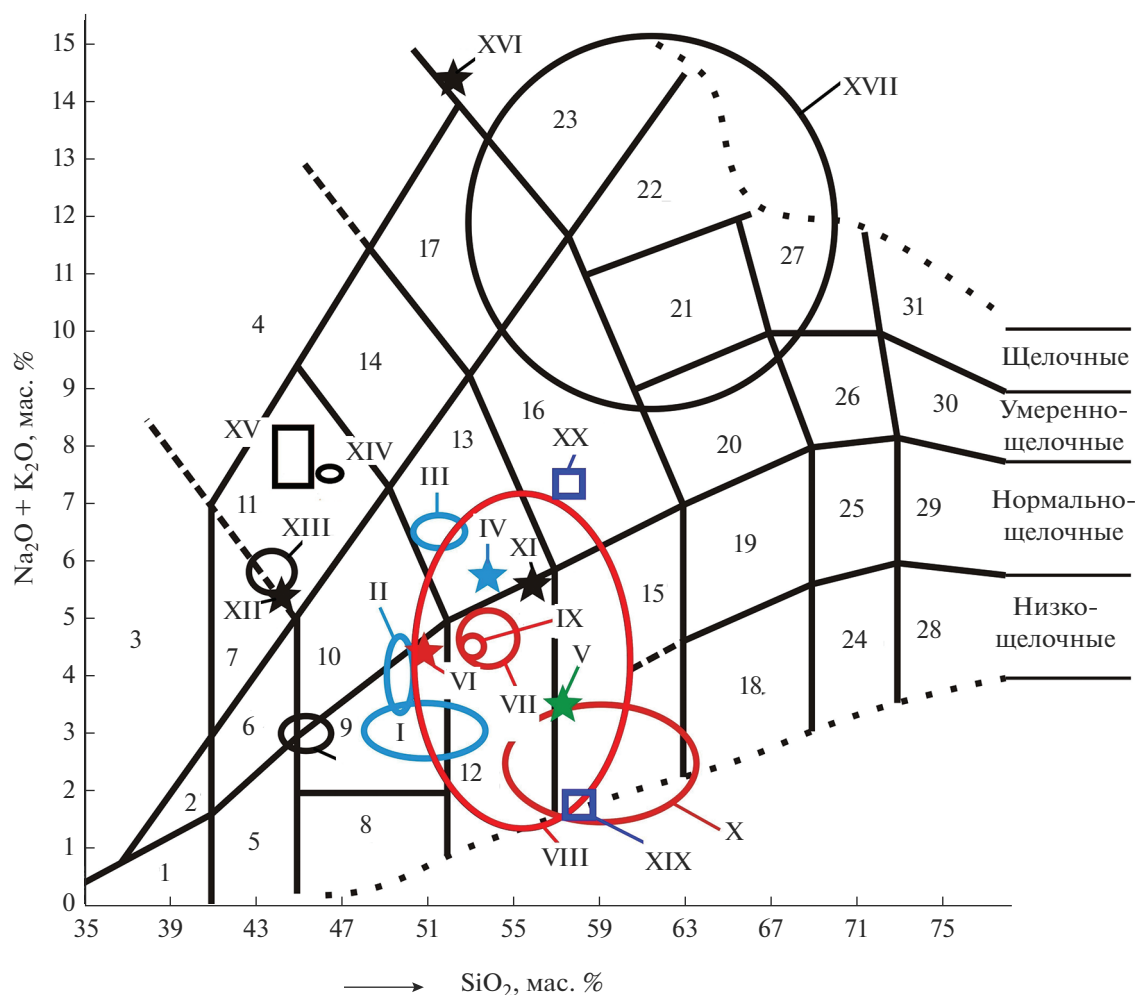


Рис. 5. Диаграмма TAS, иллюстрирующая химизм исследованных пеллов и тефр.

Поля на диаграмме: 1 – пикриты; 2, 3 – пикриты, соответственно умеренно-щелочные и щелочные; 4 – фойдиты; 5–7 – пикробазальты, соответственно ультраосновные, умеренно-щелочные, щелочные (тефриты); 8 – базальты основные; 9 – базальты; 10 – трахибазальты; 11 – базальты щелочные (базаниты); 12 – андезибазальты; 13 – трахиандезибазальты; 14 – фонотефриты; 15 – андезиты; 16 – трахиандезиты; 17 – тефрифоновиты; 18 – дациты низкощелочные; 19 – дациты; 20 – трахидациты; 21 – трахиты; 22 – трахиты щелочные; 23 – фоновиты; 24 – риодациты низкощелочные; 25 – трахидациты; 26 – трахириодациты; 27 – риодациты щелочные (пантеллериты); 28 – риолиты низкощелочные; 29 – риолиты; 30 – трахириолиты; 31 – риолиты щелочные (комендиты).

Объекты исследований: I – Толбачик, БТТИ (1975–1976 гг.), лавы; II – Толбачик, БТТИ, алмазосодержащая тефра; III – Толбачик, ТТИ-50 (2012–2013 гг.), лавы; IV – Толбачик, ТТИ-50, алмазосодержащая тефра; V – Корякский (2008–2009 гг.), алмазосодержащая тефра; VI – Ключевской (2009 г.), алмазосодержащая тефра; VII – Ключевской (кратерное извержение, 2020–2021 гг.), тефра; VIII – Ключевской (кратерное извержение, 2020–2021 гг.), тефра; IX – Ключевской, прорыв Горшкова (2021 г.), лава, шлаки, бомба, тефра; X – Ключевской, прорыв Горшкова (2021 г.), стеклофаза в лаве, шлаках, бомбе, тефре; XI – Эйяфьяллайёкюдль, Исландия (2010 г.), тефра; XII – Этна, Сицилия (1669 г.), тефра; XIII – Кубре-Вьяха (2021 г.), тефра; XIV – Кубре-Вьяха (2021 г.), стеклофаза в тефре; XV – Кумбре-Вьяха (2021 г.), шлаки и лава (данные по [Romero et al., 2022]); XVI – Эребус, Антарктида (2000 г.), тефра; XVII – Эребус, Антарктида (2000 г.), стеклофаза в тефре; 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.

в целом низкий – доконтинентально-коровый – уровень геохимической дифференциации, на что указывают отношения групповых содержаний (центростремительных + минимально-центробежных) и (дефицитно-центробежных + центробежных) элементов. При этом обнаруживается некоторое снижение степени дифференцирован-

ности в направлении от гравийных фракций к песчаным.

На основе геохимических индикаторов можно сделать следующие геодинамические выводы. По соотношению Nb/La и La/Yb исследованная нами тефра соответствует средним показателям для вулканитов внутриплитных океанических остро-

Таблица 1. Микроэлементы в составе тефры с вулкана Кумбре-Вьяха, г/т

Элементы	1	2	3	4	5
Li	7.5	7.5	7.3	7	7.2
Be	2.1	2	2	1.9	2
V	286	287	283	291	291
Cr	250	228	294	295	270
Co	44	41	44	43	42
Ni	95	83	107	101	93
Zn	104	212	270	183	102
Ga	20	20	20	20	20
Ge	4.4	4.4	4.8	4.8	4.6
Rb	34	34	34	33	35
Ba	521	532	512	497	518
Cd	5.3	5.5	5.6	5.5	5.2
Cs	0.42	0.42	0.4	0.39	0.41
Zr	306	306	305	303	306
Hf	8	7.7	7.6	7.7	7.4
Ta	68	75	23	8.2	6.1
W	1.1	1.1	1.1	0.98	1
Nb	75	78	75	73	76
Mo	3.7	3.9	3.4	3.3	3.4
Pb	4.6	5.9	4.8	3.7	3.4
Bi	62	69	18	3.6	1.8
Th	14	14	14	13	14
U	2.5	2.5	2.3	2.2	2.3
Ag	0.87	0.89	0.92	0.9	0.87
Au	4.8	5.3	1.5	0.49	0.28
Ir	0.028	0.033	0.031	0.03	0.034
Pt	0.1	0.097	0.095	0.096	0.092
Rh	0.08	0.076	0.069	0.068	0.069
Pd	3.6	3.6	3.5	3.5	3.6
Sc	24	24	24	26	23
Y	28	28	28	28	28
La	76	75	74	72	73
Ce	148	148	145	141	146
Pr	17	17	17	17	17
Nd	67	67	66	64	65
Sm	12	11	11	11	11
Eu	3.9	3.8	3.8	3.7	3.8
Gd	13	13	12	12	12
Tb	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Dy	7.1	7	6.9	6.9	6.8
Ho	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
Er	3.3	3.2	3.2	3.2	3.1
Tm	0.4	0.4	0.39	0.38	0.38
Yb	2.4	2.3	2.3	2.3	2.3
Lu	0.36	0.34	0.34	0.34	0.34
Сумма	2333.258	2432.656	2441.045	2296.874	2211.175
Ц ₁	17.04	14.84	18.44	19.29	18.5
Ц ₂	17.83	21.58	23.72	21.81	18.9
Ц ₃	4.13	4.26	2.16	1.66	1.62
Ц ₄	61	59.32	55.68	57.24	60.98
Ц ₃₊₄ /Ц ₁₊₂	1.85	1.75	1.37	1.43	1.67

Примечание. 1 – валовый состав; 2–5 – гранулометрические фракции (мм), соответственно +2 (гравийная), –2 + 1 (пески грубозернистые), –1 + 0.5 (пески крупнозернистые), –0.5 мм (пески средне-мелкозернистые).

Группы элементов по геохимическим свойствам [Щербаков, 1976]: Ц₁ – центростремительные, Ц₂ – минимально-центробежные, Ц₃ – дефицитно-центробежные, Ц₄ – центробежные.

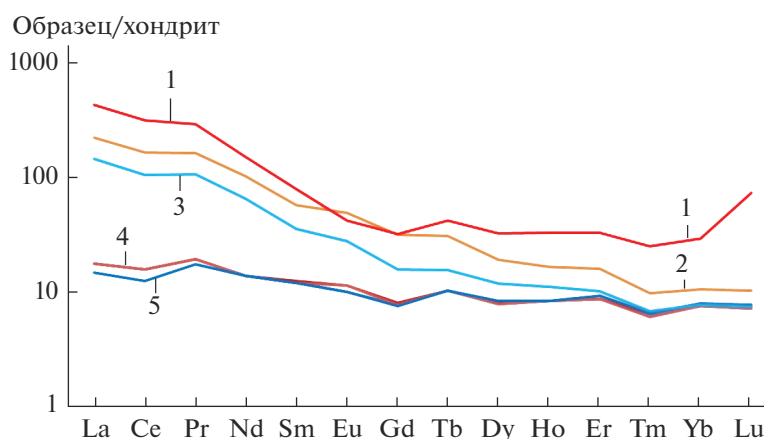


Рис. 6. Хондритнормированные концентрации лантаноидов в вулканических пеплах и тефрах. 1 – Эребус (2002 г.), 2 – Кумбре-Вьяха (2021 г.), 3 – Этна (1645 г.), 4 – Ключевской (кратерное извержение, 2020–2021 гг.), 5 – Ключевской (прорыв Горшкова, 2021 г.)

вов (OIB). В координатах отношений Th/Yb–Ta/Yb и Hf/3–Th–Ta [Wood, 1980] наш образец тоже отвечает внутриплитным вулканам в океанах. На треугольной диаграмме Y/15La/10–Nb/8 [Cabaniš, Lecolle, 1989] материал исследованной пробы попадает в поле плюмовых вулканов. В этой связи большой интерес представляют данные по изотопии стронция и неодима. В нашем случае вулканический материал характеризуется следующими значениями изотопных коэффициентов: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.703687 \pm 0.000012$; $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.513086 \pm 0.000009$. Полученные результаты соответствуют магматитам именно мантийного происхождения.

Обращает также на себя внимание высокое содержание в исследуемой тефре сидерофильных элементов – V, Cr, Co, Ni, когерентных глубинным основным и ультраосновным магматическим породам. Это можно интерпретировать как следствие выноса перечисленных элементов при дегазации мантии [Дмитриев и др., 1970]. Индикационной является также лантаноидная геохимия. В этом отношении тефра Кумбре-Вьяха 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. 6), что отражается величиной отношения $\text{La}_N/\text{Ib}_N = 21.8\text{--}22.7$. В тефрах островодужных вулканов, как известно, реализуется субгоризонтальный тренд таких концентрациях с $\text{La}_N/\text{Ib}_N = 3\text{--}4$.

Особый интерес вызывает факт аномального обогащения исследованной тефры благородны-

ми и платиноидными элементами. 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 золота валовое содержание изменяется в ряду гранулометрических фракций от 5 до 0.3 г/т, из чего следует, что оно в тефре Кумбре-Вьяха в основном присутствует в фазово-гетерогенной форме, т. е. в виде золотин. Следует напомнить, что ранее подобное обогащение отмечалось для плюмовых исландских вулканов [Карпов и др., 2012].

ЛИТОГЕННАЯ ГАЗОВАЯ ФАЗА

Анализ состава литогенной газовой фазы, выделенной нагреванием из исследуемой тефры, привел к следующему результату (мкг/г): $\text{H}_2 = 0.25$; $\text{CO} = 9.76$; $\text{CO}_2 = 88.95$; $\text{H}_2\text{O} = 120$; $\text{CH}_4 = 0.80$; $\text{C}_2\text{H}_4 = 21.37$; $\text{C}_2\text{H}_6 = 0.32$; $(\text{C}_3\text{H}_6 + \text{C}_3\text{H}_8) = 1.55$. Из приведенных данных следует, что состав неорганических компонентов газовой фазы в целом соответствует пограничной области между коровыми и мантийно-коровыми производными, но при этом характеризуется относительно низким содержанием воды (рис. 7). Состав органических газов отличается ранее еще не отмечавшимся в вулканиках преобладанием углеводородов C_2 над суммой $\text{C}_1 + \text{C}_3$.

МИКРОЛИТЫ

Методом рентгенофазового анализа в составе исследуемой тефры диагностированы пять минералов (d_0 , Å, в скобках – индексы hkl).

Оливин: 5.11–5.14 (020); 3.90–3.91 (021); 2.99 (002); 2.77–2.79 (130); 2.51–2.52 (131); 2.46–2.47 (112); 2.36 (041); 2.27–2.28 (122); 2.24–2.26 (140); 2.16–2.17 (211).

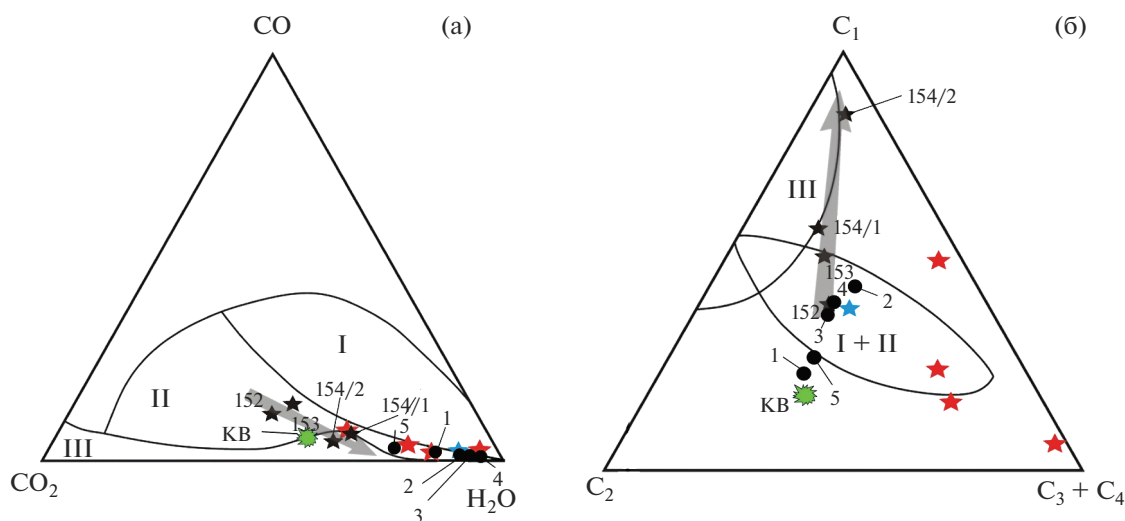


Рис. 7. Состав неорганических (а) и органических (б) литогенных газов в исследованных пеплах.

Области на треугольниках: I – мантийные производные, II – продукты мантийно-коровых взаимодействий, III – коровые образования. Звезды: черные – тефра кратерных извержений вулкана Ключевской (2020 г.); красные – тефра с вулкана Этна (1669 г.); синяя – пепел с вулкана Эребус (2000 г.). Черные круги – продукты побочного извержения вулкана Ключевской (Прорыв Горшкова, 2021 г.): лава (1), шлаки (2–4), бомба (5). КВ – тефра с вулкана Кумбре-Вьяха.

Клинопироксен: 4.68–4.71 (220); 4.43–4.44 (11–1); 3.64 (111); 3.34–3.35 (021); 3.21–3.22 (220); 2.99–3 (22–1); 2.94–2.95 (310); 2.90 (31–1); 2.55–2.57 (13–1); 2.51–2.54 (002); 2.28–2.30 (311); 2.22 (112); 2.14–2.17 (330); 2.13 (33–1); 2.11 (42–1); 2.03–2.04 (041); 2.02 (40–2); 1.858 (331); 1.832–1.835 (510); 1.816–1.817 (132); 1.770–1.772 (421); 1.745–1.749 (150); 1.683 (15–1); 1.673–1.675 (042); 1.623–1.624 (22–3); 1.612–1.613 (440); 1.593 (530); 1.579 (600); 1.544–1.548 (550).

Амфибол (актинолит): 8.37 (110); 3.13–3.14 (310).

Плагиоклазы: 6.42–8.46 (1–10); 4.68–4.69 (0–22); 4.03–4.05 (–202); 3.76 (1–30); 3.64 (130); 3.18–3.21 (–204); 3.12–3.13 (220); 3.03 (1–32); 2.94–2.95 (0–42); 2.83–2.84 (132); 2.65 (–134); 2.51–2.52 (1–14); 2.13 (220). Микролиты плагиоклазов особенно характерны для фракций средне- и мелкозернистых песков.

Кварц: 4.26 (1–14); 3.34 (101); 2.28 (102); 2.13 (220); 1.544 (211). Обнаружен во фракции крупнозернистых песков.

Результаты СЭМ-исследований (рис. 8, 9) позволяют следующим образом охарактеризовать микротовую компоненту в тефре Кумбре-Вьяха.

Оливин в гравийных частицах представлен субизометричными и несколько вытянутыми индивидами размером $(16 \pm 17) \pm (9 \pm 6)$ мкм, с коэффициентом удлинения 1.59 ± 0.72 . В песчаных частицах индивиды оливина на порядок более крупные, составляя $(145 \pm 175) \times (81 \pm 87)$ мкм, с коэффициентом удлинения 1.48 ± 0.36 . Коэффициент корреляции длины и ширины индивидов

оливина в частицах всех гранулометрических фракций лежит в пределах 0.91–0.99. Составу оливина (табл. 2) отвечает эмпирическая брутто-формула $(\text{Mg}_{1.46-1.67}\text{Fe}_{0.33-0.5}\text{Mn}_{0-0.01}\text{Ca}_{0-0.01})_{1.98-2.03}[\text{SiO}_4]$. В минальном отношении это соответствует 73–84 мол. % форстерита. Обнаруженная в исследованном минерале примесь кальция типоморфна именно для оливина, кристаллизующегося из фолитовых и щелочно-пикробазальтовых расплавов [Пономарев, 2014].

Клинопироксены в гравийных частицах наблюдаются в виде вытянутых кристаллов размером $(32 \pm 15) \times (9 \pm 6)$ мкм, с коэффициентом удлинения 6 ± 5 и коэффициентом корреляции между длиной и шириной – 0.4. В частицах песчаных фракций индивиды несколько более крупные и при этом менее удлиненные: $(48 \pm 26) \times (20 \pm 10)$ мкм, с коэффициентом удлинения 2.6 ± 1 и коэффициентом корреляции 0.80. Отвечающая химическому составу (табл. 3) эмпирическая брутто-формула имеет вид – $(\text{Ca}_{0.77-0.9}\text{Na}_{0.02-0.08})_{0.84-0.98}(\text{Mg}_{0.53-0.83}\text{Fe}_{0.2-0.3}\text{Ti}_{0.03-0.17}\text{Al}_{0-0.16}\text{Cr}_{0-0.01})_{1.09-1.24}[\text{Si}_{1.53-1.89}\text{Al}_{0.11-0.47}\text{O}_6]$. Это соответствует следующему минальному составу (мол. %): диопсид = 73 ± 5 ; геденбертит = 27 ± 5 . По содержанию в исследуемой тефре клинопироксены существенно уступают оливину, что свидетельствует о дефиците воды в среде кристаллизации [Giehl et al., 2013]. Последнее вполне соответствует вышеприведенным экспериментальным данным о составе законсервированной в частицах тефры литогенной газовой фазы.

Плагиоклазы в частицах исследуемой тефры подразделяются по размеру индивидов на две популяции – мелко- и крупнокристаллическую. В

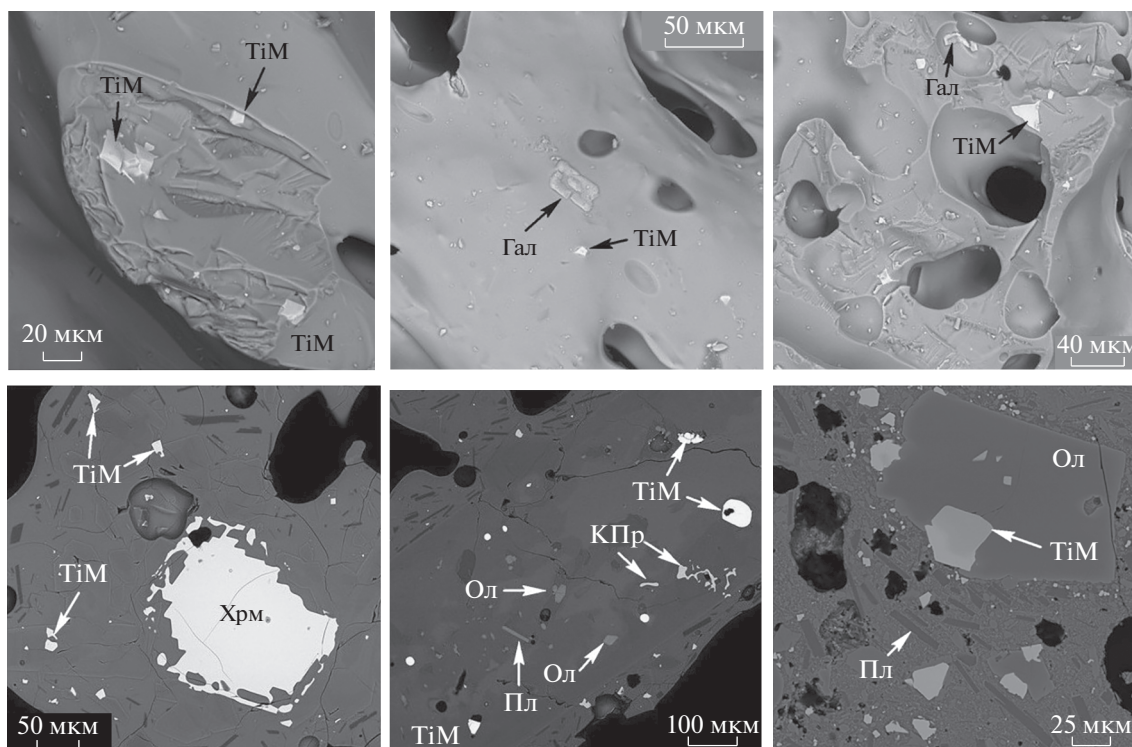


Рис. 8. Микролиты в частицах гравийной фракции.

Хрм – хромшпинелид, Ол – оливин, КПр – клинопироксен, Пл – плагиоклазы, TiM – титаномagnetит, Гал – галит.

Таблица 2. Химический состав (мас. %) и эмпирические формулы оливина

№ п/п	SiO ₂	FeO	MgO	MnO	CaO	Эмпирические формулы	Минеральный состав
1	39.14	18.83	41.29	0.37	0.37	(Mg _{1.58} Fe _{0.4} Ca _{0.01} Mn _{0.01}) ₂ [SiO ₄]	Fo ₇₉
2	39.04	18.95	41.18	0.41	0.42	(Mg _{1.58} Fe _{0.4} Ca _{0.01} Mn _{0.01}) ₂ [SiO ₄]	Fo ₇₉
3	39.18	18.51	41.52	0.38	0.41	(Mg _{1.59} Fe _{0.39} Ca _{0.01} Mn _{0.01}) ₂ [SiO ₄]	Fo ₈₀
4	39.4	17.36	42.88	н. о.	0.36	(Mg _{1.63} Fe _{0.37} Ca _{0.01}) _{2.01} [SiO ₄]	Fo ₈₂
5	39.67	16.51	43.53	«	0.29	(Mg _{1.65} Fe _{0.35} Ca _{0.01}) _{2.01} [SiO ₄]	Fo ₈₃
6	39.01	19.62	40.69	0.32	0.36	(Mg _{1.57} Fe _{0.42} Ca _{0.01} Mn _{0.01}) _{2.01} [SiO ₄]	Fo ₇₈
7	39.48	16.16	43.96	н. о.	0.4	(Mg _{1.67} Fe _{0.34} Ca _{0.01}) _{2.02} [SiO ₄]	Fo ₈₄
8	39.72	15.88	44.07	«	0.33	(Mg _{1.66} Fe _{0.33} Ca _{0.01}) ₂ [SiO ₄]	Fo ₈₃
9	38.96	19.25	41.12	0.35	0.32	(Mg _{1.58} Fe _{0.41} Ca _{0.01} Mn _{0.01}) _{2.01} [SiO ₄]	Fo ₇₉
10	38.76	19.45	40.98	0.45	0.36	(Mg _{1.59} Fe _{0.42} Ca _{0.01} Mn _{0.01}) _{2.03} [SiO ₄]	Fo ₇₉
11	39.61	15.99	43.87	0.24	0.29	(Mg _{1.66} Fe _{0.34} Ca _{0.01}) _{2.01} [SiO ₄]	Fo ₈₃
12	39.52	15.99	43.87	0.32	0.3	(Mg _{1.67} Fe _{0.34} Ca _{0.01} Mn _{0.01}) _{2.03} [SiO ₄]	Fo ₈₄
13	37.91	24.05	36.96	0.61	0.47	(Mg _{1.46} Fe _{0.5} Ca _{0.01} Mn _{0.01}) _{1.98} [SiO ₄]	Fo ₇₃
14	39.06	18.27	42.02	0.3	0.35	(Mg _{1.61} Fe _{0.39} Ca _{0.01} Mn _{0.01}) _{2.02} [SiO ₄]	Fo ₇₉

Примечание. н. о. – не обнаружен.

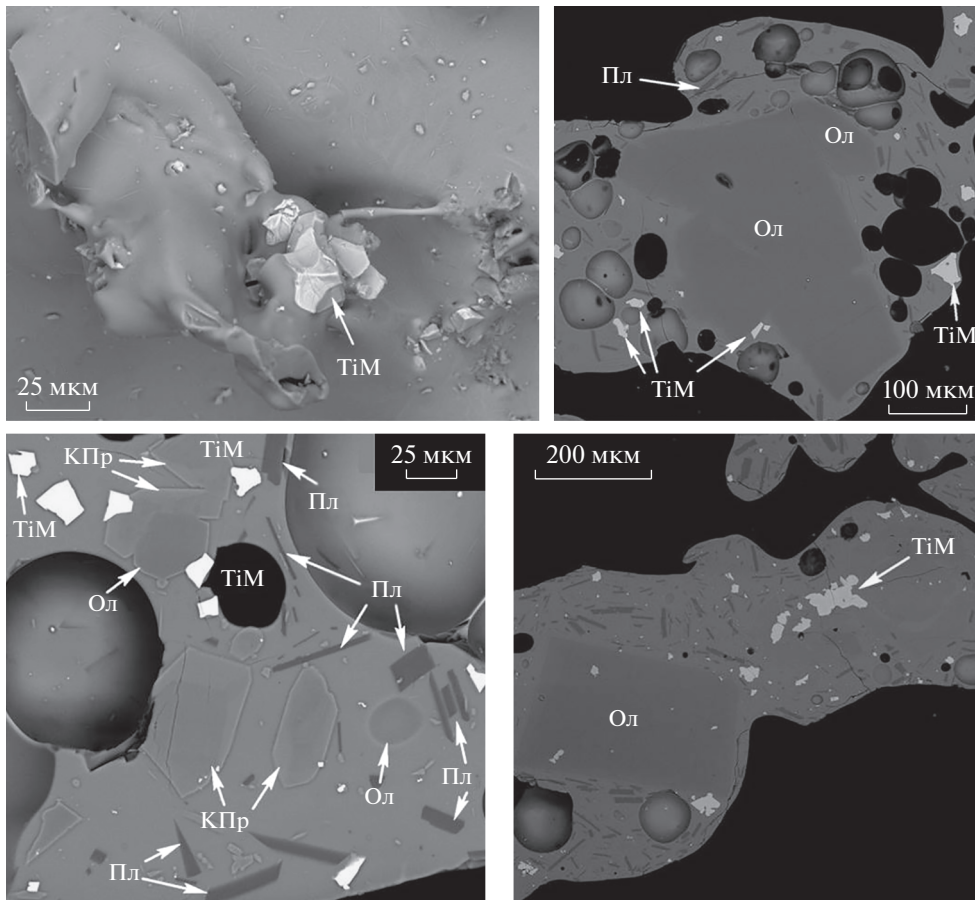


Рис. 9. Микролиты в частицах песчаных фракций. Условные обозначения минералов см. рис. 8.

гравийных частицах размер мелких кристаллов лежит в пределах $(24 \pm 14) \times (3 \pm 1.7)$ мкм, коэффициент удлинения составляет 9 ± 7 , коэффициент корреляции между длиной и толщиной составляет 0.47. Размер крупных кристаллов достигает $(703 \pm 185) \times (83 \pm 40)$ мкм при коэффициенте удлинения 11 ± 7 , корреляции между длиной и толщиной в этом случае не обнаружено. В песчаных частицах размер мелких кристаллов составляет $(15 \pm 9) \times (2 \pm 3)$ мкм при коэффициенте удлинения 12 ± 7 и коэффициенте корреляции 0.74. Крупные кристаллы здесь по размеру варьируются в пределах $(34 \pm 14) \times (6 \pm 3)$ мкм при коэффициенте удлинения 9 ± 8 и коэффициенте корреляции -0.27 . Соответствующая химическому составу (табл. 4) эмпирическая брутто-формула плагиоклазов определяется как $(\text{Ca}_{0.45-0.66}\text{Na}_{0.34-0.55})[\text{Al}_{1.45-1.66}\text{Si}_{2.34-2.55}\text{O}_8]$, что в минимальном выражении отвечает An_{45-66} . В смысле разновидностей исследованные плагиоклазы эквипропорционально представлены андезином и лабрадором. Судя по составу породообразующих минералов, эвтектоидный расплав мог характеризоваться температурой $1400-1500^\circ\text{C}$ и давлением $0.5-1$ ГПа [Green, Ringwood, 1967].

Титаномагнетит наблюдается в виде идиоморфных и угловато-неправильных индивидов. В гравийных частицах их размер находится в пределах $(23 \pm 37) \times (17 \pm 31)$ мкм с коэффициентом удлинения 1.6 ± 0.7 и коэффициентом корреляции между измерениями 0.99. В песчаных частицах размер индивидов составляет $(25 \pm 25) \times (16 \pm 18)$ мкм с коэффициентом удлинения 1.78 ± 0.82 и коэффициентом корреляции 0.95. Анализ химического состава (табл. 5) привел к выводу о том, что исследованный титаномагнетит представляет собой фазово-гомогенные твердые растворы ильменита в поликомпонентном 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 [Грачев и др., 2011]. Полученные нами данные хорошо проецируются на статистику титанистости такого рода магнетитов (рис. 10). По геотермометру Линдсли [Spenser, Lindcley, 1981] выявленные в тefре Кумбре-Вьяха титаномагнетитовые твердые растворы кристаллизовались при температуре выше 900°C . Судя по отсутствию признаков распада, ильменит-магнетитовых твердых растворов образовались на зна-

Таблица 3. Химический состав (мас. %) и эмпирические формулы клинопироксенов

№ п/п	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	Эмпирические формулы
1	45.15	3.54	8.28	7.62	н.о.	12.67	22.14	0.6	(Ca _{0.9} Na _{0.03}) _{0.93} (Mg _{0.72} Fe _{0.24} Ti _{0.05} Al _{0.08} Cr _{0.01}) _{1.1} [Si _{1.72} Al _{0.28} O ₆]
2	47.54	2.86	5.6	7.88	«	13.66	22.04	0.42	(Ca _{0.88} Na _{0.03}) _{0.91} (Mg _{0.76} Fe _{0.24} Ti _{0.08} Al _{0.01}) _{1.09} [Si _{1.76} Al _{0.24} O ₆]
3	41.65	5.94	10.59	8.68	«	10.68	21.83	0.63	(Ca _{0.88} Na _{0.04}) _{0.92} (Mg _{0.6} Fe _{0.27} Ti _{0.17} Al _{0.03}) _{1.07} [Si _{1.57} Al _{0.43} O ₆]
4	41.91	5.16	10.41	8.67	«	11.05	22.26	0.54	(Ca _{0.89} Na _{0.04}) _{0.93} (Mg _{0.62} Fe _{0.27} Ti _{0.14} Al _{0.03}) _{1.06} [Si _{1.57} Al _{0.43} O ₆]
5	50.44	1.94	3.94	6.66	«	15.04	21.57	0.41	(Ca _{0.85} Na _{0.03}) _{0.88} (Mg _{0.76} Fe _{0.2} Ti _{0.05} Al _{0.03}) _{1.04} [Si _{1.89} Al _{0.11} O ₆]
6	43.17	5.92	12.44	9.46	«	9.53	18.53	0.95	(Ca _{0.77} Na _{0.07}) _{0.84} (Mg _{0.53} Fe _{0.29} Ti _{0.17} Al _{0.16}) _{1.15} [Si _{1.62} Al _{0.38} O ₆]
7	40.67	5.75	11.66	9.59	«	9.81	21.75	0.77	(Ca _{0.88} Na _{0.05}) _{0.93} (Mg _{0.55} Fe _{0.3} Ti _{0.16} Al _{0.05}) _{1.06} [Si _{1.53} Al _{0.47} O ₆]
8	45.37	3.54	8.13	7.7	«	12.34	22.39	0.53	(Ca _{0.9} Na _{0.04}) _{0.94} (Mg _{0.69} Fe _{0.24} Ti _{0.1} Al _{0.05}) _{1.08} [Si _{1.7} Al _{0.3} O ₆]
9	42.02	5.35	10.32	8.63	«	10.64	22.47	0.57	(Ca _{0.9} Na _{0.04}) _{0.94} (Mg _{0.6} Fe _{0.27} Ti _{0.15} Al _{0.03}) _{1.05} [Si _{1.58} Al _{0.42} O ₆]
10	46.88	2.88	7.09	7.39	«	13.21	22.01	0.54	(Ca _{0.87} Na _{0.04}) _{0.91} (Mg _{0.73} Fe _{0.23} Ti _{0.04} Al _{0.04}) _{1.04} [Si _{1.73} Al _{0.27} O ₆]
11	49.81	1.88	4.23	6.7	«	15.11	21.92	0.35	(Ca _{0.86} Na _{0.02}) _{0.88} (Mg _{0.83} Fe _{0.2} Ti _{0.03} Al _{0.1}) _{1.24} [Si _{1.82} Al _{0.18} O ₆]
12	43.91	4.41	8.93	8.62	«	11.68	21.94	0.51	(Ca _{0.88} Na _{0.04}) _{0.92} (Mg _{0.65} Fe _{0.27} Ti _{0.12} Al _{0.04}) _{1.08} [Si _{1.64} Al _{0.36} O ₆]
13	46.8	2.79	7.12	7.28	«	12.95	22.52	0.54	(Ca _{0.89} Na _{0.04}) _{0.93} (Mg _{0.72} Fe _{0.22} Ti _{0.08} Al _{0.04}) _{1.06} [Si _{1.73} Al _{0.27} O ₆]
14	40.97	5.7	11.04	8.86	«	10.52	22.36	0.55	(Ca _{0.9} Na _{0.04}) _{0.94} (Mg _{0.59} Fe _{0.28} Ti _{0.16} Al _{0.03}) _{1.06} [Si _{1.72} Al _{0.28} O ₆]
15	45.14	3.76	8.17	7.45	«	12.46	22.48	0.54	(Ca _{0.88} Na _{0.04}) _{0.92} (Mg _{0.69} Fe _{0.23} Ti _{0.1} Al _{0.03}) _{1.05} [Si _{1.68} Al _{0.32} O ₆]
16	47.32	2.58	7.21	7.54	«	12.78	22.14	0.43	(Ca _{0.88} Na _{0.03}) _{0.91} (Mg _{0.71} Fe _{0.23} Ti _{0.04} Al _{0.07}) _{1.05} [Si _{1.76} Al _{0.24} O ₆]
17	46.6	3.46	5.82	8.68	0.28	13.22	21.77	0.45	(Ca _{0.87} Na _{0.03}) _{0.9} (Mg _{0.74} Fe _{0.27} Ti _{0.1}) _{1.11} [Si _{1.74} Al _{0.26} O ₆]
18	46.52	2.43	6.64	9.56	н.о.	11.17	22.23	1.17	(Ca _{0.89} Na _{0.08} Mn _{0.01}) _{0.98} (Mg _{0.62} Fe _{0.3} Ti _{0.07} Al _{0.03}) _{1.02} [Si _{1.74} Al _{0.26} O ₆]
19	45.14	3.75	8.17	7.45	«	12.46	24.48	0.55	(Ca _{0.9} Na _{0.04}) _{0.94} (Mg _{0.69} Fe _{0.23} Ti _{0.1} Al _{0.03}) _{1.05} [Si _{1.68} Al _{0.32} O ₆]
20	47.18	2.57	7.19	7.52	«	12.74	22.08	0.72	(Ca _{0.88} Na _{0.05}) _{0.93} (Mg _{0.71} Fe _{0.23} Ti _{0.07} Al _{0.06}) _{1.1} [Si _{1.75} Al _{0.25} O ₆]
21	46.6	3.46	5.83	8.72	«	13.22	21.77	0.4	(Ca _{0.87} Na _{0.03}) _{0.9} (Mg _{0.74} Fe _{0.27} Ti _{0.1}) _{1.1} [Si _{1.74} Al _{0.26} O ₆]

Таблица 4. Химический состав (мас. %) и эмпирические формулы плагиоклазов

№ п/п	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	Эмпирические формулы
1	52.01	30.37	12.87	4.75	(Ca _{0.63} Na _{0.37})[Al _{1.63} Si _{2.37} O ₈] (An ₆₃)
2	53.02	31.79	9.54	5.65	(Ca _{0.48} Na _{0.52})[Al _{1.48} Si _{2.52} O ₈] (An ₄₈)
3	51.49	31.11	13.52	3.88	(Ca _{0.66} Na _{0.34})[Al _{1.66} Si _{2.34} O ₈] (An ₆₆)
4	53.71	29.08	12.13	5.08	(Ca _{0.55} Na _{0.45})[Al _{1.55} Si _{2.45} O ₈] (An ₅₅)
5	56.68	27.57	9.49	6.26	(Ca _{0.46} Na _{0.54})[Al _{1.46} Si _{2.54} O ₈] (An ₄₆)
6	56.83	27.42	9.4	6.35	(Ca _{0.45} Na _{0.55})[Al _{1.45} Si _{2.55} O ₈] (An ₄₅)
7	52.37	29.90	13.31	4.42	(Ca _{0.6} Na _{0.4})[Al _{1.61} Si _{2.39} O ₈] (An ₆₀)
8	56.13	27.42	10.33	6.12	(Ca _{0.47} Na _{0.53})[Al _{1.47} Si _{2.53} O ₈] (An ₄₇)

Таблица 5. Химический (мас. %) и минеральный (мол. %) состав шпинелидов

№ п/п	Компоненты состава, мас. %										Минералы, мол. %				
	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	TiO ₂	NiO	MnO	MgO	V ₂ O ₅	Шпинель MgAl ₂ O ₄	Галаксит MnAl ₂ O ₄	Магнетит MgFe ₂ O ₄	Феррохромит FeCr ₂ O ₄	Магнетит FeFe ₂ O ₄	Кулсонит FeV ₂ O ₄	Треворит NiFe ₂ O ₄
1	68.78	8.68	1.13	14.1	н. о.	0.58	6.18	0.55	24	1	21	2	51	1	0
2	69.82	6.33	н. о.	16.25	»	0.68	6.14	0.78	16.5	3	31.5	0	47.5	1.5	0
3	67.46	8.4	1.0	15.73	»	0.62	6.25	0.54	22	3	25	2	47	1	0
4	72.77	7.23	0.3	13.09	»	0.31	5.88	0.42	19.5	1	22.5	0.5	56	0.5	0
5	61.67	11.12	5.5	14.7	»	0.52	5.99	0.5	29.5	2	13.5	10.5	43.5	1	0
6	70.96	4.93	н. о.	15.82	»	0.48	7.26	0.55	13	2	42	0	42	1	0
7	67.97	9.92	0.41	16.32	»	0.48	4.25	0.65	11	2	5	1	80	1	0
8	61.03	13.98	н. о.	16.57	»	0.45	7.37	0.6	38	2	16	0	43	1	0
9	62.18	14.02	0.41	15.18	»	0.44	7.19	0.58	37	2	14	1	45	1	0
10	65.54	8.83	н. о.	19.77	»	0.45	4.64	0.77	26.5	2	13.5	0	56.5	1.5	0
11	60.53	14.53	4.33	13.03	»	н. о.	6.86	0.72	38.5	0	7.5	7.5	45.5	1	0
12	78.69	3.52	16.14	0.45	0.79	»	0.41	н. о.	2	0	0	25	65	0	2
13	67.91	6.43	н. о.	17.42	н. о.	»	7.56	0.68	20	0	39	0	40	1	0
14	65.27	6.91	»	20.11	»	»	6.95	0.76	22.5	0	36.5	0	39.5	1.5	0
15	66.61	6.62	»	18.72	»	0.64	6.76	0.65	18.5	3	37.5	0	40	1	0
16	49.41	17.77	12.4	9.31	»	н. о.	10.48	0.63	40.5	0	20.2	19	19.3	1	0
17	63.88	5.1	2.41	21.9	»	0.78	5.93	н. о.	14.5	4	39.5	6	36	0	0
18	38.33	21.25	25.76	3.92	»	н. о.	10.74	»	43	0	12	32.5	12.5	0	0
19	64.05	6.32	3.42	17.63	»	0.72	6.89	0.97	16.5	3	38.5	7	33.5	1.5	0
20	67.43	6.42	н. о.	18.36	»	0.52	6.72	0.55	20.5	2	34.5	0	42	1	0
21	66.34	7.88	1.81	16.38	»	»	6.97	0.62	23.5	0	29.5	3.5	42.5	1	0
22	66.39	6.37	н. о.	19.69	»	0.52	6.81	0.22	17	2	38	0	42.5	0.5	0
23	70.14	4.92	»	17.28	»	н. о.	7.25	0.41	15.5	0	42.5	0	41.5	0.5	0
24	67.55	6.67	»	17.16	»	0.5	7.47	0.65	18.5	2	39.5	0	39	1	0
25	66.85	7.67	»	16.93	»	0.51	7.53	0.51	21	2	37	0	39	1	0
Среднее	65.1	8.87	3.0	15.43	0.03	0.37	6.66	0.53	22.76	1.52	26.23	4.76	44.47	0.9	0.08
СКО	7.65	4.32	6.21	4.78	0.16	0.27	1.9	0.25	10.06	1.43	13.11	8.54	13.57	0.43	0.4

Примечание. Эмпирические формулы: 1 — 0.75(Fe_{0.53}Mg_{0.45}Mn_{0.02})(Fe_{1.45}Al_{0.49}Cr_{0.04}V_{0.02}) + 0.25FeTiO₃; 2 — 0.7(Fe_{0.49}Mg_{0.48}Mn_{0.03})(Fe_{1.58}Al_{0.39}V_{0.03})₂ + 0.3FeTiO₃; 3 — 0.72(Fe_{0.5}Mg_{0.47}Mn_{0.03})(Fe_{1.44}Al_{0.5}Cr_{0.04}V_{0.02})₂ + 0.28FeTiO₃; 4 — 0.76(Fe_{0.57}Mg_{0.42}Mn_{0.01})(Fe_{1.57}Al_{0.41}Cr_{0.01}V_{0.01})₂ + 0.24FeTiO₃; 5 — 0.73(Fe_{0.55}Mg_{0.43}Mn_{0.02})(Fe_{1.14}Al_{0.63}Cr_{0.21}V_{0.02})₂ + 0.27FeTiO₃; 6 — 0.71(Fe_{0.43}Mg_{0.55}Mn_{0.02})(Fe_{1.68}Al_{0.3}V_{0.02})₂ + 0.29FeTiO₃; 7 — 0.7(Fe_{0.65}Mg_{0.33}Mn_{0.02})(Fe_{1.36}Al_{0.6}Cr_{0.02}V_{0.02})₂ + 0.3FeTiO₃; 8 — 0.71(Fe_{0.44}Mg_{0.54}Mn_{0.02})(Fe_{1.18}Al_{0.8}V_{0.02})₂ + 0.25FeTiO₃; 9 — 0.74(Fe_{0.47}Mg_{0.51}Mn_{0.02})(Fe_{1.18}Al_{0.78}Cr_{0.02}V_{0.02})₂ + 0.26FeTiO₃; 10 — 0.64(Fe_{0.58}Mg_{0.4}Mn_{0.02})(Fe_{1.38}Al_{0.59}V_{0.03})₂ + 0.36FeTiO₃; 11 — 0.77(Fe_{0.54}Mg_{0.46})(Fe_{1.06}Al_{0.77}Cr_{0.15}V_{0.02})₂ + 0.23FeTiO₃; 12 — 0.99(Fe_{0.96}Mg_{0.02}Ni_{0.02})(Fe_{1.34}Al_{0.16}Cr_{0.5})₂ + 0.01FeTiO₃; 13 — 0.69(Fe_{0.41}Mg_{0.59})(Fe_{1.58}Al_{0.4}V_{0.02})₂ + 0.31FeTiO₃; 14 — 0.63(Fe_{0.41}Mg_{0.59})(Fe_{1.52}Al_{0.45}V_{0.03})₂ + 0.37FeTiO₃; 15 — 0.66(Fe_{0.41}Mg_{0.56}Mn_{0.03})(Fe_{1.55}Al_{0.43}V_{0.02})₂ + 0.34FeTiO₃; 16 — 0.85(Fe_{0.39}Mg_{0.61})(Fe_{0.79}Al_{0.81}Cr_{0.38}V_{0.02})₂ + 0.15FeTiO₃; 17 — 0.6(Fe_{0.42}Mg_{0.54}Mn_{0.04})(Fe_{1.51}Al_{0.37}Cr_{0.12})₂ + 0.4FeTiO₃; 18 — 0.93(Fe_{0.43}Mg_{0.55})(Fe_{0.49}Al_{0.86}Cr_{0.65})₂ + 0.07FeTiO₃; 19 — 0.68(Fe_{0.42}Mg_{0.55}Mn_{0.03})(Fe_{1.44}Al_{0.39}Cr_{0.14}V_{0.03})₂ + 0.32FeTiO₃; 20 — 0.67(Fe_{0.43}Mg_{0.55}Mn_{0.02})(Fe_{1.57}Al_{0.41}V_{0.02})₂ + 0.36FeTiO₃; 21 — 0.71(Fe_{0.47}Mg_{0.53})(Fe_{1.44}Al_{0.47}Cr_{0.07}V_{0.02})₂ + 0.29FeTiO₃; 22 — 0.64(Fe_{0.41}Mg_{0.57}Mn_{0.02})(Fe_{1.57}Al_{0.42}V_{0.01})₂ + 0.36FeTiO₃; 23 — 0.69(Fe_{0.42}Mg_{0.58})(Fe_{1.68}Al_{0.31}V_{0.01})₂ + 0.31FeTiO₃; 24 — 0.69(Fe_{0.4}Mg_{0.58}Mn_{0.02})(Fe_{1.57}Al_{0.41}V_{0.02})₂ + 0.32FeTiO₃; 25 — 0.7(Fe_{0.4}Mg_{0.58}Mn_{0.02})(Fe_{1.52}Al_{0.46}V_{0.02})₂ + 0.3FeTiO₃.

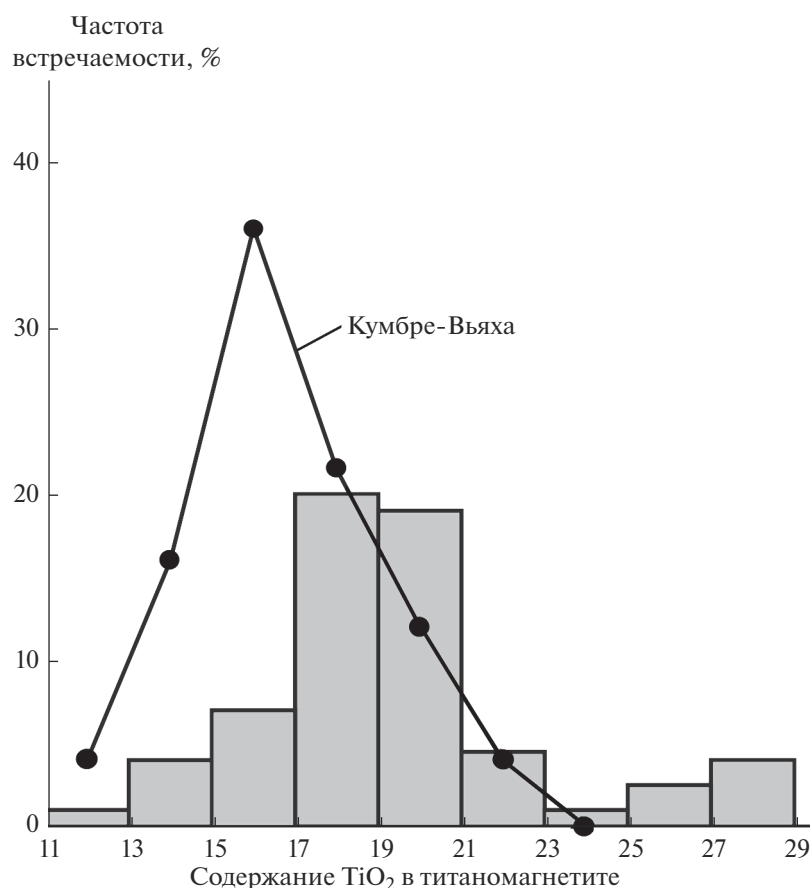


Рис. 10. Распределение TiO_2 в титаномагнетитовых твердых растворах, обнаруженных в тефре Кумбре-Вьяха (вариационная линия), на фоне общей статистики [Грачев и др., 2011].

чительной глубине и затем были молниеносно эвакуированы на земную поверхность. В минальный состав магнетитовой основы исследованных твердых растворов входят (в скобках содержания в мол. %) магнетит (44.47 ± 13.57), шпинель (22.76 ± 10.06), галаксит (1.52 ± 1.43), магнезиоферрит (26.23 ± 13.1), феррихромит (4.76 ± 8.54), кулсонит (0.9 ± 0.43), треворит (0.08 ± 0.4). Средние пропорции между группами миналов разной плотности определяются в следующем виде (мол. %): высокоплотные (шпинель + галаксит) — 24.48; умеренно-высокоплотные (магнезиоферрит + феррихромит) — 30.99; относительно низкоплотные (магнетит + колсунит + треворит) — 45.55. Показательно, что между группами плотных и низкоплотных миналов реализуется аналитически-отрицательная корреляция с коэффициентом -0.99 . Выявленный факт явного обогащения титаномагнетита высокоплотными миналами, очевидно, подтверждает его кристаллизацию на значительных глубинах.

Хромшпинелиды обнаружены только в гравийных частицах в виде единичных зерен неправильной формы на порядок более крупного размера,

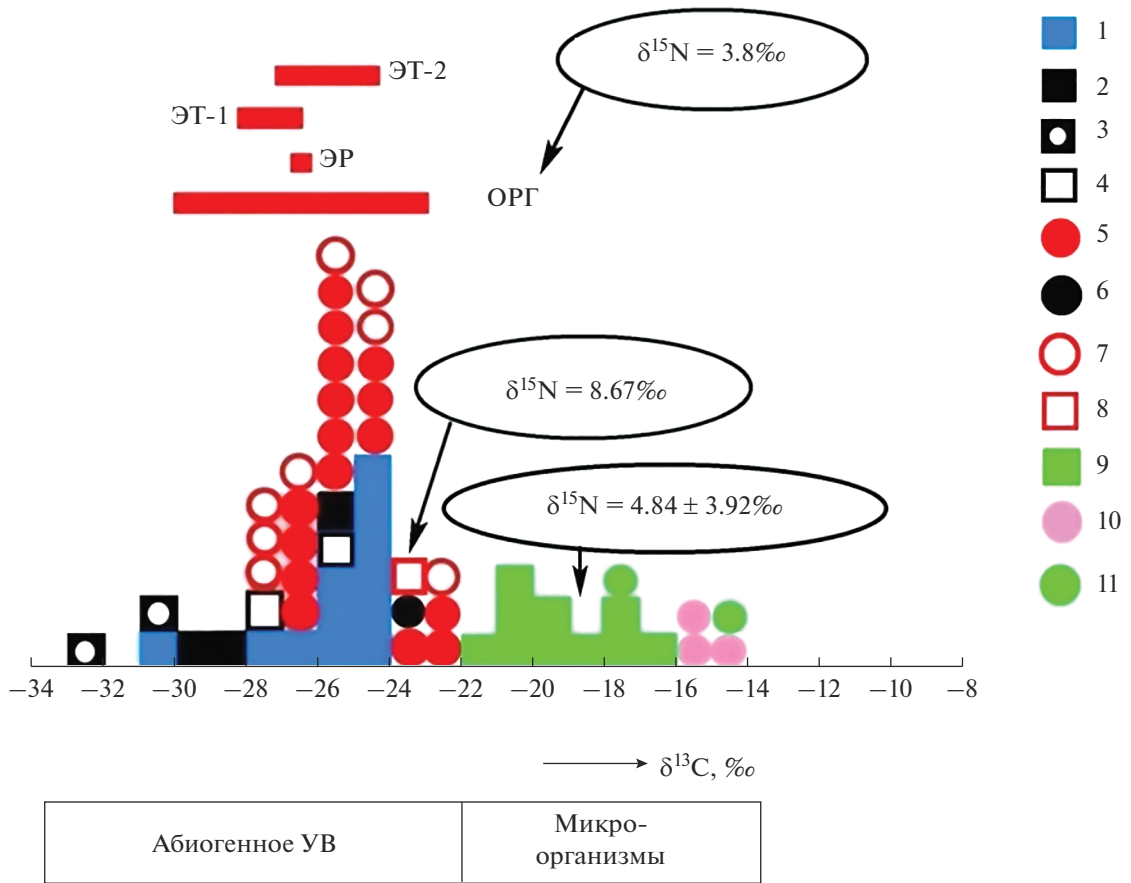
чем кристаллы титаномагнетита: $(287 \pm 190) \times (127 \times 77)$ мкм с коэффициентом удлинения 1.85 ± 1.04 и коэффициентом корреляции между длиной и шириной 0.85. Брутто-формула минерала — $(Fe_{0.39-0.96}Mg_{0.02-0.61}Ni_{0.09-0.02})(Fe_{0.39-1.34}Cr_{0.35-0.65}Al_{0.16-0.86}V_{0-0.02})_2O_4$. Мольная пропорция $MgCr_2O_4/FeCr_2O_4$ варьируется в пределах 0.35–1.

Кроме отмеченных выше минералов, в частицах тефры обнаружены *галит*, фазы *никель-медистого самородного железа* $Fe_{0.63-0.92}Ni_{0.04-0.05}Cu_{0.03-0.33}$, *гидроксил-хлориды* состава $(Na_{0.91-0.96}K_{0-0.01}Ca_{0.02-0.04}Fe_{0.01-0.04})Cl_{0.67-0.82}(OH)_{0.26-0.36}$ и единичные зерна кварца.

УГЛЕРОДНОЕ ВЕЩЕСТВО

В исследованной тефре выявлено содержание $C_{орг}$ в пределах 0.05–0.1 мас. %, обусловленное присутствием дисперсно-рассеянного углеродного вещества. Изотопный состав углерода ($\delta^{13}C_{PDB}$, ‰) в нем варьируется в пределах от -30 до -24 ‰, имея тенденцию к облегчению в направлении от гравийной фракции к песчано-мел-

(a)



(б)

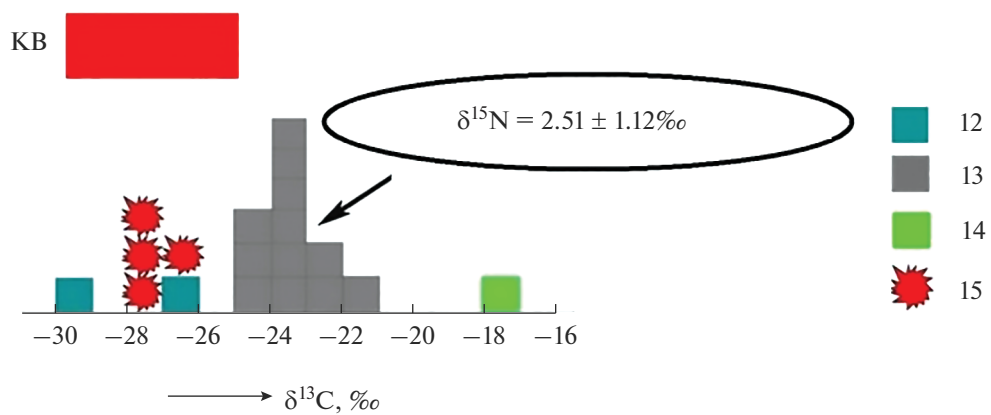


Рис. 11. Изотопный состав углерода в продуктах современного вулканизма на Камчатке и в современных микроорганизмах (а) в сравнении с продуктами вулканизма и рудообразования в рифтовой зоне Срединно-Атлантического хребта и в тefре вулкана Кумбре-Вьяха (б).

а – 1–8 – углеродные фазы и минералы, соответственно дисперсно-рассеянное углеродное вещество в вулканитах (1), частицы шунгитоподобного вещества (2), парафиноподобная фаза (3), частицы самородного алюминия с включениями углеродного вещества (4), алмазы (5), диуглеродные глобулы (6), карбиды (7), углеродное вещество в fumarole “Ядовитой” (8); 9–11 – микроорганизмы, соответственно бактерии (9), дрожжи (10) и хлорелла (11). Рамками показаны диапазоны варьирования изотопного состава углерода в вулканогенных органидах с Камчатки (ОРГ), в дисперсно-рассеянном углероде в вулканитах Эребуса (ЭР) и Этны (ЭТ-1), в органидах из тefры Этны (ЭТ-2); б – 12 – дисперсно-рассеянное углеродное вещество в магматитах, 13 – углеродизированные шлаки, 14 – биогенное органическое вещество на поверхности шлаковых частиц, 15 – дисперсное углеродное вещество в сульфидных рудах с гидротермальных полей САХ – Ашадзе 1, Ашадзе 2, Зенит-Виктория, Коралловое, Краснов, Молодежное, Петербургское, Победа 1, Семенов; KB – то же в тefре вулкана Кумбре-Вьяха.

козернистой (‰): валовая проба = -26.32 , гравийные фракции = $-26.83...-24.92$, песок грубозернистый = -27.51 , песок крупнозернистый = -28.96 , песок среднезернистый = -27.33 , песок мелкозернистый = -29.35 . На генеральной диаграмме (рис. 11) изотопные данные по углероду в тefре Кумбре-Вьяхи вполне совпадают с диапазоном изотопного варьирования абиогенного углерода в продуктах континентального и океанического вулканизма [Силаев и др., 2018, 2019б, 2022].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные нами комплексные минералогическо-геохимические исследования представительной пробы тefры с вулкана Кумбре-Вьяха (извержение 2020–2021 гг.), показали, что она имеет гравийно-псаммитовый гранулометрический состав, а частицы характеризуются аномально высокой степенью везикулярности. По валовому химическому составу эта тefра соответствует переходу от щелочных пикробазальтов к щелочным базальтам, принципиально отличаясь от пеплов тefры окраинно-континентальных вулканов (базальты, андезибазальты и андезиты) высоким содержанием магния и аномальной щелочностью. Наряду с этим тefра Кумбре-Вьяха по общему химизму сходна с продуктами океанического вулканизма в зоне Срединного-Атлантического хребта, отличаясь от них только повышенной (в 2–3 раза) щелочностью.

В составе исследованной тefры обнаружено 45 микроэлементов с валовым содержанием до 2333 г/т, что превышает таковое в тefрах островодужных вулканов. По соотношению геохимических критериев тefра с Кумбре-Вьяха соответствует средним показателям для внутриплитных вулканов в океанах. Геохимической особенностью изученной тefры является сильное обогащение лантаноидами, благородными и платиноидными металлами. Сумма содержаний продуктивных металлов достигает 9.5 г/т, что сопоставимо с соответствующими оруденениями месторождений вулканогенно-гидротермального типа.

В составе литогенной газовой фазы, выделенной нагреванием из исследуемой тefры, установлены H_2 , CO, CO_2 , H_2O , CH_4 , C_2H_4 , C_2H_6 , C_3H_6 , C_3H_8 . Пропорции между неорганическими компонентами в газовой фазе в целом соответствуют пограничной области между коровыми и мантийно-коровыми производными, но при этом обнаруживается относительно низкое содержание воды. Состав органических газов отличается ранее еще не отмечавшимся в тefрах островодужных вулканов преобладанием углеводородов C2 над суммой C1 + C3.

В составе микролитов выявлены и изучены оливин состава Fo_{73-84} , существенно диопсидовый клинопироксен, плагиоклазы состава андезин-битовнит, хромшпинелиды, фазово-гомогенные твердые растворы ильменита в магнетите, фазы Ni-Cu-содержащего самородного железа, кварц, натриевые гидроксил-хлориды. Кроме того, в тefре Кумбре-Вьяха обнаружено дисперсно-рассеянное углеродное вещество с изотопным составом углерода $\delta^{13}C_{PDB} = -30...-24‰$, что соответствует изотопному составу углерода в абиогенных углеродных веществах вулканогенного происхождения.

Вся совокупность результатов минералогическо-геохимических исследований характеризует вулкан Кумбре-Вьяха как типичного представителя внутриплитно-океанических плюмовых вулканов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы глубоко признательны А.В. Шевченко (ИВиС ДВО РАН; GFZ, ФРГ) и ее коллегам в Потсдамском центре имени Гельмгольца, ФРГ, за передачу нам на исследования пробы тefры, отобранной на вулкане Кумбре-Вьяха сразу после его извержения в 2021 г. За техническую помощь в подготовке материала авторы благодарят К.В. Тарасова (ИВиС ДВО РАН).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гордеев Е.И., Бергаль-Кувикас О.В.* Строение и вулканизм зоны субдукции на Камчатке // Докл. РАН. 2022. Т. 502. № 2. С. 72–76.
- Гордеев Е.И., Карнов Г.А.* Фундаментальные достижения академической науки в исследованиях вулканов и землетрясений на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 2022. № 4. С. 4–16.
- 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.
- Грачев А.Ф., Печорский Д.М., Цельмович В.А.* Титаномагнетиты и ильмениты из раннепротерозойских базальтов и лимбургитов Северного Тянь-Шаня // Физика Земли. 2011. № 6. С. 13–25.
- Дмитриев Л.В., Барсуков В.Л., Удинцев Г.Б.* Рифтовые зоны океана и проблема рудообразования // Геохимия. 1970. № 8. С. 935–944.
- Карнов Г.А., Аникин Л.П., Николаева А.Г.* Самородные металлы и интерметаллиды в пеплах действующих вулканов Камчатки и Исландии // Материалы конференции, посвященной Дню вулканолога: “Вулканизм и связанные с ним процессы”. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2012. С. 183–187.
- Карнов Г.А., Силаев В.И., Аникин Л.П. и др.* Эксплозивная минерализация // Толбачинское трещинное извержение 2012–2013 гг. Новосибирск: СО РАН, 2017. С. 241–255.
- Пономарев Г.П.* Содержание кальция в кристаллах оливина, выросших из экспериментальных расплавов. Ч. I // Литосфера. 2014. № 4. С. 66–79.
- Салтыковский А.А., Титаева Н.А., Геншафт Ю.С.* Изотопия, геохимия базальтов Исландии и мантийный плюм // Вулканология и сейсмология. 1998. № 3. С. 25–38.
- Силаев В.И., Аникин Л.П., Шанина С.Н. и др.* Абиогенные конденсированные органические полимеры в продуктах современного вулканизма в связи с проблемой возникновения жизни на Земле. Сыктывкар: Геопринт, 2018. 128 с.
- Силаев В.И., Добрецова И.Г., Антошкина А.И. и др.* Гидротермальные сульфидные оруденения в Российском разведочном районе Срединно-Атлантического хребта // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Вып. 25. Пермь: Пермский гос. университет, 2022. С. 226–238.
- Силаев В.И., Карнов Г.А., Аникин Л.П. и др.* Минерально-фазовый парагенезис в эксплозивных продуктах современных извержений вулканов Камчатки и Курил. Ч. I. Алмазы, углеродные фазы, конденсированные органоиды // Вулканология и сейсмология. 2019а. № 5. С. 54–67.
- Силаев В.И., Карнов Г.А., Аникин Л.П. и др.* Минерально-фазовый парагенезис в эксплозивных продуктах современных извержений вулканов Камчатки и Курил. Ч. 2. Минералы-спутники алмазов толбачинского типа // Вулканология и сейсмология. 2019б. № 6. С. 36–49.
- Силаев В.И., Карнов Г.А., Аникин Л.П. и др.* Тейфра катасстрофического извержения вулкана Этна на Сицилии в 1669 г.: ее петро-минералого-геохимические свойства и геодинамический аспект // Вулканология и сейсмология. 2021. № 3. С. 41–62.
- Силаев В.И., Карнов Г.А., Филиппов В.Н. и др.* Минералого-геохимические свойства прикратерной тейфры вулкана Эребус (Антарктида) из материалов извержения 2000 г. // Вулканология и сейсмология. 2020. № 4. С. 40–56.
- Соболев А.В., Никогонесян И.К.* Петрология магматизма долгоживущих мантийных струй: Гавайские острова (Тихий океан) и остров Реюньон (Индийский океан) // Петрология. 1994. № 2. С. 131–168.
- Чернышева Е.А., Ерошенко Д.В.* Закономерности вариации состава плюмовых вулканов в Южной Атлантике и на Африканской плите // Океанология. 2019. № 2. С. 271–281.
- Щербаков Ю.Г.* Геохимическая эволюция и рудные формации // Проблемы эндогенного рудообразования и металлогении. Новосибирск: Наука, 1976. С. 217–229.
- 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. 2022. doi.org/<https://doi.org/10.1038/s41597-022-01551-81>
- Romero J.E., Burton M., Caceres F. et al.* The initial phase of the 2021 Cumbre-Vieja ridge eruption (Canary Islands): Products and dynamics controlling edifice growth and collapse // J. Volcanol. and Geotherm. Res. 2022. V. 431. P. 1–16.
- Cabanis B., Lecolle M.* Le diagramme La/10–Y/15–Nb/8: un unties pour la discrimination des series volcaniques et la mise en evidence des processus de melange et/on de contamination on crustale // C.R. Acad. Sci. Ser. II. 1989. V. 309. P. 2023–2029.
- Giehl C., Marks M., Nowak M.* Phase relations and liquid lines of descent an iron-rich peralkalinen phonolitic melt: An experimental study // Contr. Miner. Petrol. 2013. № 2. P. 283–304.
- Green D.H., Ringwood A.E.* An experimental investigation of the gabbro to eclogite transformation and its petrological application // Geochim. Cosmochim. Acta. 1967. V. 31. № 5. P. 767–833.
- Spenser K.J., Lindsley D.H.* Solution model for coexisting iron-titanium oxides // Amer. Mineral. 1981. V. 66. P. 1189–1201.
- Wood D.A.* The application of Th–Hf–Ta diagram to problem of tectonomagmatic classification and to establish the basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province // Earth and Planet. Sci. Lett. 1980. V. 50. P. 11–30.

Tephra from the Island Intra-Plate-Oceanic Volcano Cumbre-Vyaha (Eruption 2021)

V. I. Silaev^{1, *}, G. A. Karpov^{2, **}, A. S. Shuisky¹, A. F. Khazov¹, G. V. Ignatiev¹, S. N. Shanina¹,
B. A. Makeev¹, I. V. Smoleva¹, and D. V. Kiselyova³

¹*Institute of Geology, Komi Scientific Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Pervomayskaya str., 54, Syktyvkar, 167982 Russia*

²*Institute of Volcanology and Seismology, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, bulvar Piipa, 9, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006 Russia*

³*Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Vonsovskogo str., 15, Yekaterinburg, 620016 Russia*

*e-mail: silaev@geo.komisc.ru

**e-mail: karpovga@kscnet.ru

Comprehensive mineralogical and geochemical studies of a representative sample of tephra from the Cumbre-Vyaha volcano (2020–2021 eruption), which has a gravel-psammitic granulometric composition and is characterized by an anomalously high degree of particle vesicularity, have been carried out. In terms of bulk chemical composition, this tephra corresponds to the transition from alkaline picrobasalts to alkaline basalts, differing fundamentally from the tephra ashes of marginal continental volcanoes. The studied tephra contains 45 trace elements with a total content of up to 2333 ppm, which exceeds that in the tephra of island-arc volcanoes. According to the ratio of geochemical criteria, tephra from Cumbre-Vyaha correspond to the average values for within-plate volcanoes in the oceans. The geochemical feature of the studied tephra is a strong enrichment in lanthanides, noble and platinoid metals. H₂, CO, CO₂, H₂O, CH₄, C₂H₄, C₂H₆, C₃H₆, C₃H₈ were found in the composition of the lithogenic gas phase separated by heating from the studied tephra. The proportions between inorganic components in the gas phase generally correspond to the boundary region between crustal and mantle-crustal derivatives, but a relatively low water content is found. Olivine of composition Fo_{73–84}, essentially diopside clinopyroxene, andesine-bytownite plagioclases, chrome spinels, phase-homogeneous solid solutions of ilmenite in magnetite, phases of Ni-Cu-bearing native iron, quartz, and sodium hydroxyl chlorides were identified and studied in microlites. In addition, dispersed carbon matter with carbon isotopic composition $\delta^{13}\text{CPDB} = -30...-24\text{‰}$ was found in the Cumbre-Vyaha tephra, which corresponds to the carbon isotope composition in abiogenic carbonaceous substances of volcanic origin. The totality of the results of mineralogical and geochemical studies characterizes the Cumbre-Vyaha volcano as a typical representative of within-plate oceanic plume volcanoes.

Keywords: plume volcanoes, Cumbre-Vyaha, 2020–2021, chemistry, trace elements, lithogenic gas phase, microlites, abiogenic carbon matter