

УДК 551.21: 551.217.24

Пеплы 2017 года с вулканов Ключевского и Камбального: сравнительный минералогический геохимический анализ

В.И. Силаев^а, Г.А. Карпов^б, Д.В. Киселёва^в, Л.П. Вергасова^б,
Б.А. Макеев^а, К.В. Тарасов^б, А.Ф. Хазов^а

^аИнститут геологии Коми НЦ УрО РАН, 167982, Сыктывкар, ул. Первомайская, 54. E-mail: silaev@geo.komisc.ru

^бИнститут вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 683006, Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, 9. E-mail: karповga@kscnet.ru

^вИнститут геологии и геохимии УрО РАН, 620016, Екатеринбург, ул. Академика Вонсовского, 15. E-mail: podarenka@mail.ru

(Статья поступила в редакцию 19 июня 2018 г.)

Приведены результаты сравнительных минералогическо-геохимических исследований материала пеплов вулканов Ключевского и Камбального, практически одновременно извергавшихся на Камчатке в марте–апреле 2017 г. Определены химический, фазовый, нормативно-минеральный и микроэлементный составы вещества. Проанализирован состав водных вытяжек из пеплов. По комплексу данных сделан вывод о том, что в обоих случаях пеплы в значительной степени имеют изначальное расплавное происхождение и обнаруживают 75 %-ное сродство с недифференцированным в коровых условиях, т. е. глубинным по источнику, магматогенным веществом. В пеплах Ключевского вулкана обнаружены нитевидные формы и частицы конденсированного абиогенного органополимерного вещества СНО-состава. В пеплах Камбального вулкана, вероятно, имеется примесь резургентного материала из древней постройки кратера, а также минералов гидротермального происхождения. Предложен вероятный сценарий образования преимущественно плагиоклазовых по минеральному составу вулканических пеплов.

Ключевые слова: *вулканы, Ключевской, Камбальный, пеплы, химический и минеральный состав, микроэлементы, абиогенные органополимеры.*

DOI: 10.17072/psu.geol.17.4.326

Введение

Весной 2017 г., с 25 марта по 9 апреля, произошли мощные пепловые выбросы на вулкане Камбальном (Гирина и др., 2017). Практически в это же время активизировался и вулкан Ключевской (рис. 1). Наиболее впечатляющим было извержение Камбального вулкана, поскольку оно произошло, вероятно, впервые за последние 600 лет (Рудич, 1978; Литасов, Важевская, 1991; Ponomareva et al., 2007). Выброс пепла из кратера Камбального вулкана достиг высоты 5–7 км, а образо-

вавшееся газово-пепловое облако распространилось на 160 км в юго-восточном, южном и юго-западном направлениях. На Ключевском вулкане в указанный период произошли пять последовательных эрупций с выбросом пеплов на высоту 6–7 км и их сносом к юго-западу и юго-востоку на расстояние до 250 км. Через несколько дней после начала извержений были сделаны отборы пеплов этих вулканов специалистами Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (Н.А. Малик, А.Ю. Озеров, С.Н. Рычагов и др. с вулкана Камбального и Ю.В. Демянчук с Ключев-

ского), часть которых была передана нам для комплексных исследований.



Рис. 1. Пепловые извержения вулканов Ключевского и Камбального на Камчатке весной 2017 г. (фотографии Ю.В. Демянчука (Ключевской) и А.В. Сокоренко (Камбальный))

Материал одновременных извержений вулканов, отстоящих друг от друга на значительном расстоянии и находящихся в различных геологических структурах (Ключевской – на севере, в Центрально-Камчатской депрессии, а Камбальный – на юго-восточном окончании Восточно-

Камчатского вулканического пояса) интересен с позиции сравнительных исследований их минералого-геохимических особенностей, учитывая неоднородность глубинного строения и различие типов вулканических извержений в пределах Камчатской островодужной системы (Федотов и др., 2019; Хубуная и др., 2009; Гонтовая и др., 2010; Гонтовая и др., 2017; Гонтовая и др., 2010; Ponomareva a. al, 2007).

Объекты и методы исследований

Объектом исследований послужили пробы тонкозернистого материала вулканических пеплов, отобранные 12 апреля 2017 г. на южном склоне Камбального вулкана (проба № 9001), там же, где была взята проба Камб./2017-1 (Рычагов и др., 2017), и 21 апреля 2017 г. на вулкане Ключевском (у подножья восточного склона, проба № 9000). Из этих проб были выделены алевритовые (> 0.08 мм) и пелитовые (< 0.08 мм) гранулометрические фракции. Кроме того, анализировались электромагнитные и магнитные концентрации алевритовых фракций (табл. 1).

Таблица 1. Реестр образцов и фракций вулканических пеплов

№ обр	Вулкан	Степень фракционирования	Гранулометрия, мм
9000/3	Ключевской	Валовая проба, вес 11.65 г	> 0.08
9000/3-1		Немагнитный концентрат, плотность < 2.8 г/см ³	
9000/3-2		Немагнитный концентрат, плотность > 2.8 г/см ³	
9000/3-3		Электромагнитный концентрат, плотность > 2.8 г/см ³	
9000/3-4		Электромагнитный концентрат, плотность < 2.8 г/см ³	
9000/3-5		Магнитный концентрат	
9000/4		Валовая проба, вес 18.5 г	< 0.08
9001/1	Камбальный	Валовая проба	< 0.08
9001/2		«	> 0.08

Для оценки состава аэрозольной компоненты, осевшей на материале пеплов, а также с целью получения данных о составе водорастворимой части пеплов, из валовых проб были сделаны водные вытяжки. Так как пробы пепла были отобраны в полиэтиленовые мешки со снега и поступили в лабораторию в замороженном виде, то методика водной вытяжки состояла в том, что материал пеплов со снегом вы-

стаивался в стеклянной посуде при комнатной температуре в течение 1–2 суток. Отделенный фильтрат исследовался стандартным методом в Аналитическом Центре ИВиС ДВО РАН.

Комплексные исследования пеплов были проведены в АЦ ИВиС ДВО РАН, в ЦКП «Геонаука» Института геологии Коми НЦ УрО РАН и в ЦКП «Геоаналитик» Института геологии и геохимии УрО

РАН. При этом использовались методы оптической микроскопии, рентгеновской дифрактометрии (Shimadzu XRD-6000), термографии (Shimadzu DTG-60A/60AH), рентгенофлуоресцентной спектрометрии (S4 PIONEER, Shimadzu XRF-1800) и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (Perkin Elmer ELAN 9000).

Результаты исследований

По внешнему виду пробы и фракции пеплов несколько различались. В частности, пеплы с Камбального вулкана были заметно светлее пеплов с Ключевского, а в пределах проб пеплов алевритовые фракции были гораздо темнее пелитовых (рис. 2).

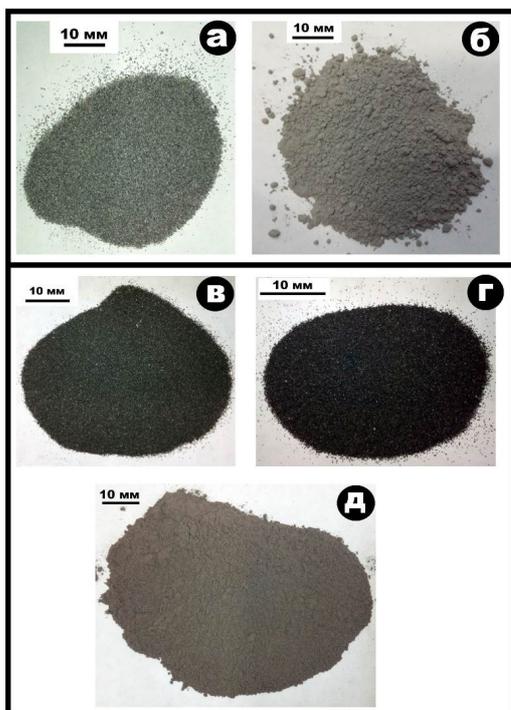


Рис. 2. Внешний вид основных фракций и концентратов, выделенных из вулканических пеплов 2017 г. с вулканов Камбального (а, б) и Ключевского (в–д). Фракции: а, в – алевритовые, валовые; б, д – пелитовые валовые; г – электромагнитный концентрат из алевритовой фракции

Морфология и размеры частиц. Форма и размеры частиц в алевритовых фракциях пеплов исследовались с использованием метода СЭМ. Согласно полученным данным, все фракции характеризуются

большой однородностью по гранулометрии, форме и характеру угловатости частиц, но при этом пеплы с Ключевского и Камбального вулканов нетождественны (рис. 3). Частицы в алевритовой фракции пепла Камбального вулкана статистически в три раза крупнее (рис. 4), менее вытянутые (коэффициент удлинения = 1.44 ± 0.42 , против $(1.57-1.72) \pm 0.48$ у частиц в пеплах с Ключевского) и характеризуются более сильной прямой корреляцией минимальных и максимальных размеров ($r = 0.66$ против $r = 0.44$ у частиц в пеплах Ключевского).

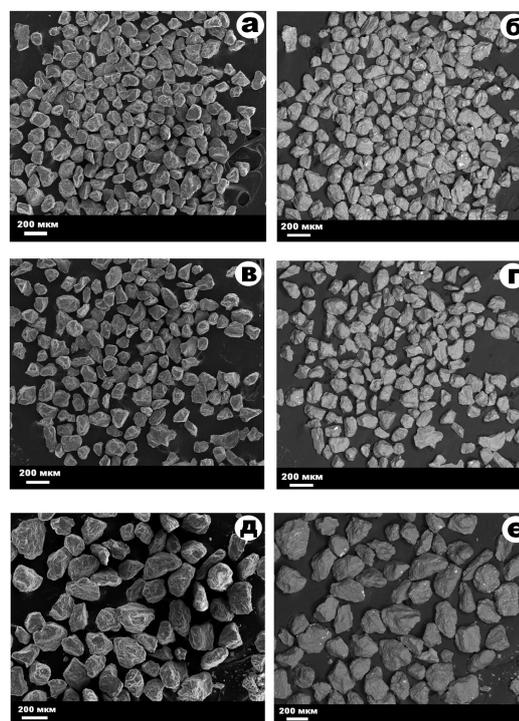


Рис. 3. Размер и морфология частиц в алевритовых фракциях пеплов 2017 г. с вулканов Ключевского (а–г) и Камбального (д–е). СЭМ-изображения в режимах вторичных (а, в, д) и упруго-отраженных (б, г, е) электронов

При этом коэффициенты вариации линейных размеров и коэффициентов удлинения частиц в пеплах Ключевского и Камбального вулканов довольно близки, располагаясь в узких пределах 23–32%. Полученные данные свидетельствуют о гранулометрической однородности исследованных образцов пеплов, материалом для которых в обоих случаях послужили магматические породы.

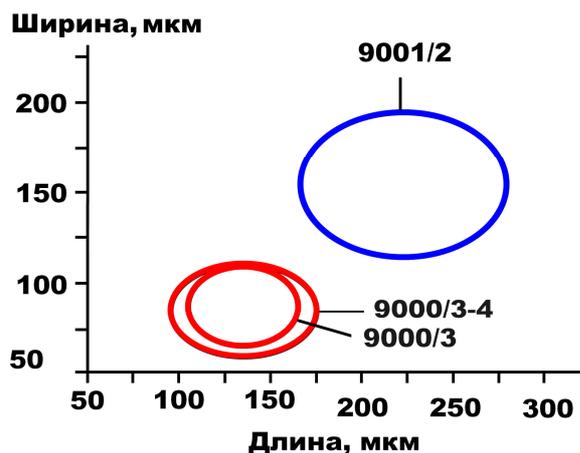


Рис. 4. Статистика (среднее \pm СКО) размеров частиц во фракциях пеплов 2017 г. с вулканов Ключевского (9000) и Камбального (9001)

Химический состав водных вытяжек. Согласно полученным результатам, суточная водная вытяжка из пеплов вулкана Ключевского характеризуется слабой кислотностью (табл. 2, проба 1) и относительно низкой минерализацией. По составу она гидрокарбонатно-хлоридная калиево-магниевая-натриевая. Суточная водная вытяжка из пеплов вулкана Камбального отличается от аналогичной пробы с Ключевского несколько большей кислотностью, более высокой минерализацией и гораздо более сложным гидрокарбонатно-сульфатно-хлоридным, калиево-магниевым-железисто-натриево-кальциевым составом (табл. 2, проба 2). Для решения вопроса об источнике анионно-катионного состава водной вытяжки из пеплов Камбального вулкана мы дополнительно использовали данные по двум водным вытяжкам из статьи С.Н. Рычагова (Рычагов и др., 2017), полученным из пеплов, отобранных в то же время и в том же месте, что и анализируемая нами проба. Различалось только время взаимодействия материала пеплов с водой. Как видно из табл. 2, проба 3 (№ Камб/2017-1 С. Н. Рычагова), выстоявшая с водой в течение 3 суток, при сходстве анионно-катионного состава отличается от взятой там же, но выстоянной нами лишь сутки пробы 2 гораздо более высокой общей минерализацией, в составе которой основное место занимают сульфат-

ион и кальций. В пробе водной вытяжки, полученной выстаиванием пепла более 30 суток (проба 4, Рычагов и др., 2017), степень минерализации возросла скачкообразно почти в 20 раз. Мы считаем, что это произошло за счет прогрессивного растворения сульфатных минералов, в первую очередь гипса, присутствие которого в пеплах Камбального вулкана было установлено и нами, и С. Н. Рычаговым с соавторами (Рычагов и др., 2017).

Таблица 2. Химический состав водных вытяжек из пеплов Ключевского (проба 1) и Камбального (пробы 2, 3, 4, 5) вулканов, мг/л

Параметры и компоненты	1	2	3	4
pH	5.63	4.73	5.15	4.18
HCO ₃ ⁻	4.88	4.88	1.20	Не обн.
F ⁻	< 0.19	< 0.19	Не обн.	Не обн.
Cl ⁻	4.97	6.39	16.00	8.52
SO ₄ ²⁻	< 2.0	8.50	451.50	825.6
Сумма	9.85	19.80	468.70	834.12
Na ⁺	0.52	1.69	11.70	26.51
K ⁺	0.07	0.51	5.00	5.97
Ca ²⁺	< 0.8	4.62	176.40	251.2
Mg ²⁺	0.11	0.27	2.80	11.14
Fe ²⁺	< 0.1	0.76	0.20	0.53
Fe ³⁺	< 0,1	< 0,1	0.50	31.41
Al ³⁺	-	24,50	0.30	-
NH ₄ ⁺	< 0,1	0.68	1.70	10.37
Сумма	0.70	33.03	198.60	337.13
H ₃ BO ₃	< 0.28	< 0.28	< 1	< 1
H ₄ SiO ₄ (раствор)	< 0.05	10.81	5.60	67.5
Минерализация	10.55	63.64	672.90	1238.79

Примечание. Пробы 1 и 2 – наши данные анализов суточной выдержки пеплов Ключевского (1) и Камбального (2) вулканов в снеговой воде. Данные получены стандартными методами, включающими фотоэлектронную колориметрию (NH₄⁺, H₄SiO₄), атомную абсорбцию (Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Fe²⁺, Fe³⁺, Al³⁺), титриметрический (HCO₃⁻, Cl⁻, SO₄²⁻, H₃BO₃), потенциометрический (pH, F). Аналитики А. А. Кузьмина и В. В. Дунин-Барковская. Данные граф 3 и 4 заимствованы из статьи Рычагова и др. (2017).

Следует отметить также, что еще Л. А. Башарина (1959) при изучении водных вытяжек из пепла вулкана Безымянного сделала вывод о том, что «анионы в водных вытяжках являются продуктами вулканических эксгалаций». Проведенные нами исследования показали, что водные

вытяжки из пеплов Ключевского и Камбального вулканов существенно различаются как по анионному, так и катионному составу. При этом гораздо более сложной оказалась водная вытяжка не из заведомо ювенильных пеплов Ключевского вулкана, как это можно было бы ожидать, а из пеплов вулкана Камбального. В этом случае вытяжка характеризовалась более высоким содержанием кальция, гидрокарбонат- и сульфат-ионов, а также железа. Обращает на себя внимание и высокое содержание в суточной вытяжке из пеплов Камбального ионов Al^{3+} , что, вероятно, указывает на присутствие алюминия в газовой фазе извержения.

Фазовый состав пеплов. Данные рентгеноструктурного анализа вулканических пеплов свидетельствуют о том, что по фазовому составу они преимущественно плагиоклазовые как в валовых пробах, так и в гранулометрических фракциях. На рентгеновских дифрактограммах преобладают сильные отражения, отвечающие основному плагиоклазу, а в качестве дополнительных выступают малоинтенсивные рефлексы от кварца (рис. 5, а). Иногда по отдельным отражениям регистрируются ортоклаз, пироксены, магнетит и пирит. Для оценки содержания в исследуемых пеплах рентгеноаморфного вулканического стекла нами дополнительно была проведена съемка с использованием алюминиевого держателя, обладающего достаточной степенью кристалличности и не вносящего вклад в дифракционную картину в области малых углов. На полученных таким образом дифрактограммах зарегистрировано аморфное гало с максимумом интенсивности, совпадающим с положением основных рентгеновских рефлексов плагиоклазов (рис. 5, б). Судя по этим рентгенограммам, содержание стеклофазы в пепле с Ключевского вулкана составляет 8–10 %, а в пепле с Камбального вулкана 14 %. Последнее примерно совпадает с соответствующими данными, полученными С. Н. Рычаговым с соавторами (Рычагов и др., 2017).

Рассчитанные по рентгеноструктурным данным параметры э. я. основных минералов в исследуемых пеплах имеют следующие значения. Вулкан **Ключевской**: плагиоклазы – $a_0 = (0.816–0.820) \pm 0.002$ нм, $b_0 = (0.1284–0.1286) \pm 0.003$ нм, $c_0 = (0.709–0.713) \pm 0.002$ нм, $\alpha = (93.3–93.5) \pm 0.3^\circ$, $\beta = (116.2–116.3) \pm 0.3^\circ$, $\gamma = (90–90.4) \pm 0.4^\circ$, $V_0 = (0.665–0.672) \pm 0.003$ нм³; *клинопироксен* – $a_0 = 0.9716 \pm 0.001$ нм, $b_0 = 0.8894 \pm 0.0009$ нм, $c_0 = 0.5256 \pm 0.0008$ нм, $\beta = 106.43 \pm 0.12^\circ$, $V_0 = 0.435 \pm 0.001$ нм³; *магнетит* – $a_0 = 0.838 \pm 0.003$ нм, $V_0 = 0.587 \pm 0.007$ нм³.

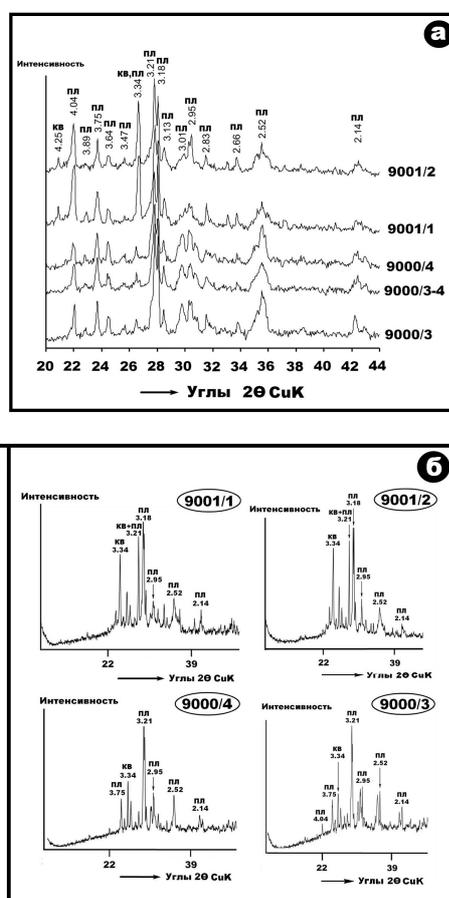


Рис. 5. Рентгеновские дифрактограммы пеплов 2017 г. с вулканов Ключевского (9000) и Камбального (9001), полученные обычным способом (а) и с использованием алюминиевого стандарта (б). Привязка к фракциям – в табл. 1

Вулкан **Камбальный**: плагиоклазы – $a_0 = (0.815–0.818) \pm 0.002$ нм, $b_0 = (0.1285–0.1287) \pm 0.003$ нм, $c_0 = (0.710–0.711) \pm 0.002$ нм, $\alpha = (93.3–93.4) \pm 0.3$ нм, $\beta =$

$(116.3-116.4) \pm 0.2^\circ$, $\gamma = (90.1-90.5) \pm 0.2^\circ$,
 $V_o = (0.666-0.668) \pm 0.002 \text{ нм}^3$.

По данным рентгеноспектрального микронзондового анализа составам плагиоклазов соответствуют следующие эмпирические формулы. Вулкан **Ключевской**: в алевритовой фракции – $(\text{Ca}_{0.58}\text{Na}_{0.32}\text{K}_{0.10})[\text{Al}_{1.58}\text{Si}_{2.42}\text{O}_8]$; в пелитовой фракции – $(\text{Ca}_{0.60}\text{Na}_{0.32}\text{K}_{0.08})[\text{Al}_{1.6}\text{Si}_{2.4}\text{O}_8]$. Вулкан **Камбальный**: в алевритовой фракции – $(\text{Ca}_{0.59}\text{Na}_{0.30}\text{K}_{0.11})[\text{Al}_{1.59}\text{Si}_{2.41}\text{O}_8]$, в пелитовой фракции – $(\text{Ca}_{0.52}\text{Na}_{0.36}\text{K}_{0.12})[\text{Al}_{1.52}\text{Si}_{2.48}\text{O}_8]$.

Согласно приведенным данным, плагиоклазы в исследуемых пеплах обоих вулканов по составу близки и в целом могут быть определены как плагиоклазы № 52–60. Кроме плагиоклазов, в исследуемых пеплах по составу диагностированы **магнетит-ульвит** $(\text{Fe}_{0.84-0.86}\text{Mg}_{0.13-0.15}\text{Mn}_{0-0.01})(\text{Fe}_{1.49-1.75}\text{Ti}_{0.22-0.48}\text{V}_{0.01-0.03})_2\text{O}_4$ (в миналах (мол. %): магнетит – 36–60, ульвит – 22–48, магноферрит – 13–15, кулсонит – 1.5–2, яacobсит – 0–1 мол.%); **ильменит** $(\text{Fe}_{0.85}\text{Mg}_{0.11}\text{Mn}_{0.03})_{0.99}(\text{Ti}_{0.90}\text{Fe}_{0.10})\text{O}_3$ (в

миналах (мол. %): ильменит – 76, гейкилит – 11 %, гематит – 10, пирофанит – 3) и **пирит** $\text{Fe}_{0.98}\text{S}_2$. В качестве минералов-примесей в пеплах Камбального вулкана диагностированы пирит, каолинит, гипс.

Помимо вышеупомянутых минералов, нами в пепле с вулкана Камбального была обнаружена удлиненная частица самородного Fe, а в пепле Ключевского вулкана – зерна природного дюралюминия и разноцветные (красные, бурые и черные) частицы и нити абиогенных органополимеров (рис. 6). Следует отметить, что такие образования уже выявлялись в продуктах извержения многих камчатских вулканов (Карпов и др., 2014; Карпов и др., 2017; Силаев и др., 2016а, б; Силаев и др., 2017). В рассматриваемом случае нити органополимеров по толщине и длине варьируются в пределах соответственно 15–150 мкм и 1–3 мм. На их рентгенограммах регистрируется аморфное гало с максимумом в области 4.5–5 Å, что соответствует аморфным углеродным соединениям.



Рис. 6. Нити и частицы органополимеров из пепла 2017 г. с вулкана Ключевского. Белыми стрелками указаны примазки вулканического стекла

По элементному составу нити несколько различаются (мас. %): **черные** C = 90.3–98.2, N = 0.3–4.5, O = 1–5.5; **бурые** C = 80.4–93.5, N = 0.8–2.5, O = 6–17.3; **красные** C = 88.9–93.2, N = 1.3–1.6, O = 6.7–8.9. Изотопный состав углерода в исследованных частицах и нитях колеблется в пределах $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} = -26.54 \dots -25.54$ ‰. Кроме того, был проанализирован изотопный состав углерода непосредственно в пеплах. Для пеплов с Ключевского и Камбального вулканов значения изотопных коэффициентов составили соответ-

ственно $-27.72 \dots -27.12$ и $-27.03 \dots -26.0$ ‰. Таким образом, получается, что по изотопному составу углерода конденсированные органические соединения из пеплов Ключевского вулкана, с одной стороны, и эндокриптное углеродное вещество в пеплах как с Ключевского, так и с Камбального вулканов, с другой стороны, практически тождественны и четко коррелируются с углеродными минералами, фазами и соединениями, выявленными нами в продуктах извержений многих камчатских вулканов.

Химический состав пеплов. По химическому составу алевритовые и пелитовые фракции в исследованных пеплах несколько различаются (табл. 3). Пеплы с вулкана Ключевского по химизму больше

похожи на андезибазальты, характеризуются более низкой кремнистостью, но повышенным содержанием магния, железа, примесью хрома, а пеплы с вулкана Камбального – ближе к андезитам.

Таблица 3. Химический состав вулканических пеплов, мас. %

Компоненты	Вулкан Ключевской			Вулкан Камбальный	
	9000/3	9000/3-3	9000/4	9001/2	9000/1
SiO ₂	50.40	51.68	50.84	57.07	56.85
TiO ₂	0.80	0.81	0.75	0.54	0.45
ZrO ₂	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Al ₂ O ₃	20.96	22.31	21.77	21.74	20.06
Cr ₂ O ₃	0.03	0.01	0.02	Не обн.	Не обн.
Fe ₂ O ₃	8.04	6.61	7.09	4.69	5.46
MnO	0.18	0.15	0.16	0.10	0.10
MgO	4.65	2.79	4.41	2.48	2.28
CaO	10.38	10.72	10.51	7.40	6.67
SrO	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03
Na ₂ O	3.07	3.30	3.05	1.98	2.44
K ₂ O	1.22	1.36	1.17	1.09	1.31
P ₂ O ₅	0.18	0.19	0.16	0.19	0.20
SO ₃	0.03	0.01	0.01	2.66	4.13
Нормативные минералы, мол. %					
Кварц	Нет	4.61	3.11	14.27	22.04
Плагиоклазы и вулканическое стекло	82.22	81.99	86.62	73.33	64.03
Mg-Fe-Са-силикаты	14.0	10.09	7.83	6.93	6.63
Циркон	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Рутил	0.52	0.56	0.53	0.36	0.32
Магнетит + хромит	2.86	2.32	1.55	2.0	2.03
Пирит	0.03	0.01	Нет	2.70	4.49
Апатит	0.35	0.40	0.34	0.39	0.44

Примечание. Аналитик С. Т. Неверов, ЦКП «Геонаука» Института геологии Коми НЦ УрО РАН.

Полученные нами данные по пеплам с вулкана Камбального довольно близки к аналогичным данным С. Н. Рычагова с соавторами (Рычагов и др., 2017): SiO₂ – 59.67 ± 0.86; TiO₂ – 0.67 ± 0.06; Al₂O₃ – 17.35 ± 0.98; Fe₂O₃ – 3.21 ± 0.30; FeO – 2.45 ± 0.34; CaO – 5.68 ± 0.64; MgO – 2.34 ± 0.28; Na₂O – 3.15 ± 0.16; K₂O – 1.18 ± 0.15 мас. %. В сопоставляемых результатах обращает на себя внимание небольшая диспропорция между SiO₂ и Al₂O₃, но это может быть обусловлено различием в эталонировании в ходе рентген-флуоресцентного анализа.

Анализ химизма пеплов с использованием тетраэдрической диаграммы (рис. 7) приводит к следующим выводам. Все исследованные образцы пеплов по составу оказались аналогичными стеклофазе в ла-

вах вулканитов ТТИ-50, изученных нами ранее, что можно, вероятно, расценивать как указание на преимущественно магматическое происхождение пеплов 2017 г. как на Ключевском, так и на Камбальном вулкане.

По кремнезёмности эти пеплы наиболее близки к андезитам и диоритам, по магнизиальности – к диоритам и гранодиоритам, по содержанию алюминия и кальция они несколько превосходят лавы ТТИ-50 (Волынец и др., 2013), а по содержанию натрия сопоставимы с магматическими породами основного состава, сближаясь с основными плагиоклазами.

Таким образом, получается, что исследованные пеплы по своему химическому составу в целом сходны со средне-основными магматическими породами, но

при этом еще более соответствуют основным плагиоклазам.

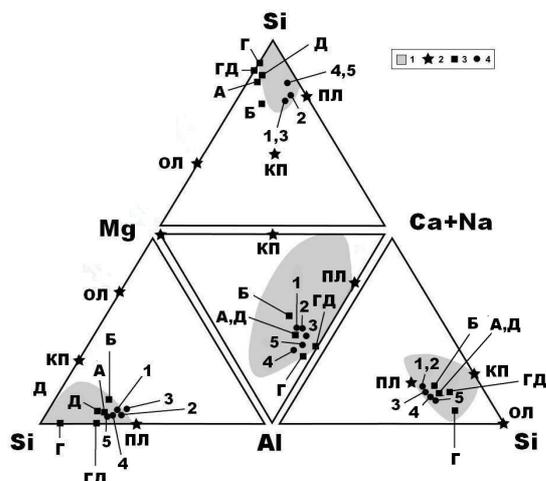


Рис. 7. Развертка тетраэдрической диаграммы химизма пеплов 2017 г. с вулканов Ключевского и Камбального: 1 – поле состава стеклофазы в лавах ТТИ-50; 2 – состав основных породообразующих минералов в камчатских вулканитах: оливина (ОЛ), клинопироксенов (КП), плагиоклазов (ПЛ); 3 – средние составы вулканических пород: базальтов (Б), андезитов (А), кварцевых диоритов (Д), гранодиоритов (ГД), гранитов (Г), средние составы вулканических пород приведены по А.Н. Заварицкому (базальты, андезиты) и Р.Д. Дэли (кварцевые диориты, гранодиориты, граниты); 4 – точки состава образцов исследуемых пеплов: 9000/3 (1), 9000/3-4 (2), 9000/4 (3), 9001/1 (4), 9001/2 (5)

Проведенные расчеты нормативного минерального состава (табл. 3) показывают, что исследуемые пеплы с Ключевского и Камбального вулканов на 65–87 % состоят из основного плагиоклаза, на 3–22 % из кварца, на 6.5–14 % из Mg-Fe-Са-силикатов (оливин, пироксены). Очевидно, что эти данные находятся в достаточном согласии с вышеприведенными результатами рентгенофазового анализа. В качестве аксессуарных минералов в пеплах, судя по расчетам, выступают шпинелиды (ульвит-магнетит, хромит), апатит, рутил, циркон и пирит. Пелитовые фракции относительно алевритовых несколько обогащены кварцем, но обеднены Mg-Fe-Са-силикатами. Сопоставление пеплов с

Ключевского и Камбального вулканов показывает, что последние относительно первых богаче кварцем и особенно пиритом, но беднее Mg-Fe-Са-силикатами.

Микроэлементы. В составе исследованных пеплов выявлены 50 микроэлементов (табл. 4), в том числе (в скобках диапазон колебаний суммарных концентраций в г/т): 5 щелочных и щелочно-земельных (220–730), 12 элементов-гидролизатов (2630–6100), 14 лантаноидов (15–50), 13 элементов-халькоцидерофилов (450–1100), 6 полу- и неметаллов (3700–7700). При этом концентрация большинства микроэлементов в пеплах вулкана Камбального ниже таковой в пеплах Ключевского на 35–45 %. Размах вариаций содержаний микроэлементов в пеплах Ключевского и Камбального вулканов, а также в алевритовых и пелитовых их фракциях совпадает и в целом сравнительно невелик (коэффициенты вариации, %): щелочные и щелочно-земельные элементы – 32–55; элементы-гидролизаты – 17–52; лантаноиды – 31–43; халькоцидерофилы – 37–118; полу- и неметаллы – 54–189. Все это свидетельствует, очевидно, о генетической однородности и аналогичном, преимущественно магматическом, происхождении исследованного пеплового материала.

Следует также отметить, что из элементов халькоцидерофилов в пеплах обоих вулканов наибольшей концентрацией выделяются Cu, Zn, Cr, Mn, т. е. именно те элементы, которые образуют в первичномагматических пеплах камчатских вулканов аксессуарную самородно-металлическую и оксидную минерализацию (Карпов и др., 2014; Силаев и др., 2017).

Расчет корреляционных связей показывает (табл. 5), что основным концентратом микроэлементов в пеплах являются плагиоклазы, дополнительным – Mg-Fe-Са-силикаты, с кварцем микроэлементы не связаны. Плагиоклазы – главный концентрат щелочных и щелочно-земельных, гидролизатных и редкозе-

Таблица 4. Микроэлементы в составе пеплов, г/т

Элементы	Вулкан Ключевской					Вулкан Камбаль- ный	
	9000/3	9000/3-1	9000/3-4	9000/3-5	9000/4	9001/1	9001/2
Li	6.636	4.309	6.178	7.203	6.579	4.549	1.366
Rb	12.559	5.018	14.888	9.784	11.862	15.513	3.784
Cs	0.422	0.176	0.506	0.372	0.416	0.870	0.186
Sr	251.602	454.557	295.488	111.984	272.455	290.136	103.547
Ba	339.466	240.472	413.168	271.022	344.309	304.707	113.952
Сумма	610.685	704.532	730.228	400.365	635.621	615.775	222.835
Sc	15.263	3.851	12.918	192.577	13.927	8.452	4.542
Ga	12.9	16.619	15.248	11.53	13.572	11.549	11.056
Y	15.834	5.26	17.353	17.245	14.908	10.716	3.854
Ti	4120.747	1135.277	4341.207	10916.322	3912.976	2324.417	2393.116
Zr	65.908	23.8	76.282	75.46	62.132	30.688	30.709
Ge	0.979	0.679	1.02	1.248	0.95	1.014	1.014
Hf	2.28	0.871	2.742	2.698	2.136	1.305	1.357
V	161.007	33.878	165.702	508.242	156.16	95.497	99.12
Nb	1.519	0.616	1.77	2.25	1.502	1.437	1.242
Ta	0.139	0.065	0.168	0.19	0.134	0.157	0.131
Th	0.699	0.3	0.82	0.66	0.629	1.403	0.498
U	0.488	0.196	0.571	0.443	0.425	0.551	0.401
Сумма элементов- гидролизатов	5619.133	2630.476	6096.257	12529.595	5450.693	3718.736	2992.71
La	5.357	2.435	6.422	5.239	5.25	6.56	1.783
Ce	13.938	5.983	16.858	13.744	13.705	15.017	4.936
Pr	2.184	0.892	2.574	2.118	2.114	2.0	0.739
Nd	10.619	4.205	12.693	10.417	10.317	9.057	3.646
Sm	3.036	1.113	3.564	2.979	2.882	2.281	1.029
Eu	1.058	0.709	1.243	0.875	1.048	0.867	0.389
Gd	3.48	1.294	4.04	3.566	3.28	2.508	1.129
Tb	0.549	0.194	0.638	0.59	0.514	0.385	0.172
Dy	3.491	1.215	4.037	3.819	3.265	2.494	1.125
Ho	0.739	0.256	0.852	0.816	0.695	0.549	0.24
Er	2.165	0.749	2.515	2.498	2.051	1.657	0.718
Tm	0.323	0.11	0.36	0.371	0.296	0.247	0.111
Yb	2.153	0.748	2.433	2.481	1.995	1.680	0.748
Lu	0.333	0.115	0.367	0.384	0.306	0.259	0.111
Сумма лантаноидов	49.425	20.018	58.596	49.897	47.781	45.561	16.876
Cr	54.239	4.304	18.896	116.623	41.379	3.773	4.419
Mn	858.955	181.477	678.391	1782.482	749.379	445.414	367.4
Co	22.684	5.204	13.706	54.924	18.726	11.536	8.484
Ni	24.318	5.834	9.207	57.155	18.72	4.138	3.557
Cu	40.606	29.398	44.585	80.269	44.75	35.631	24.907
Zn	52.915	14.612	47.367	137.54	48.368	44.622	32.534
Mo	0.492	0.186	0.518	0.79	0.502	1.282	0.64
Ag	0.164	0.136	0.18	0.277	0.139	0.115	0.103
Cd	0.114	0.068	0.124	0.165	0.154	0.236	0.126
Sn	0.698	0.231	0.779	1.283	0.65	0.636	0.598
W	0.132	0.067	0.159	0.156	0.132	0.282	0.218
Tl	0.077	0.103	0.132	0.077	0.102	0.366	0.326
Pb	2.92	2.267	3.87	2.637	3.656	15.051	12.252
Сумма сидеро-халь- кофильных элементов	1058.314	243.887	817.914	2234.378	926.657	563.082	455.564

Таблица 4. Окончание

Элементы	Вулкан Ключевской					Вулкан Камбальный	
	9000/3	9000/3-1	9000/3-4	9000/3-5	9000/4	9001/1	9001/2
B	362.124	225.16	150.758	192.577	86.555	78.474	64.732
As	1.633	1.092	1.692	1.621	1.807	11.858	10.231
Se	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.	5.083	2.181
Sb	0.157	0.087	0.207	0.163	0.17	0.396	0.387
Te	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.	0.052	0.29	0.137
Bi	0.03	0.034	0.031	0.087	0.045	0.763	0.479
Сумма неметаллов	363.944	226.373	152.688	194.448	88.629	96.864	78.147
Итого	7701.501	3826.286	7855.683	15408.683	7149.38 1	5040.018	3766.132
Геохимические модули							
Rb/Cs	29.76	28.51	29.42	26.30	28.51	17.83	20.34
Zr/Hf	28.91	27.32	27.82	27.97	29.09	23.52	22.63
Y/Zr	0.24	0.22	0.23	0.23	0.24	0.35	0.13
Nb/Ta	10.93	9.47	10.54	11.84	11.21	9.15	9.48
Th/U	1.43	1.53	1.44	1.49	1.48	2.55	1.24
La/Yb	2.49	3.26	2.64	2.11	2.63	3.90	2.38
Ni/Co	1.07	1.12	0.67	1.04	1.0	0.36	0.42
Cu/Zn	0.77	2.01	0.94	0.58	0.93	0.80	0.77
Cu/Sn	58.17	127.26	57.23	62.56	68.85	56.02	41.65
Pb/Ag	17.8	16.67	21.5	9.52	25.65	23.66	20.49
As/Sb	10.40	12.55	8.17	9.94	10.63	29.94	26.44
Se/Te	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	17.52	15.92

Примечание. Фракции: **9000/3** — алевритовая валовая; **9000/3-1** — алевритовая, неэлектромагнитный концентрат; **9000/3-4** — алевритовая, электромагнитный концентрат; **9000/3-5** — алевритовая, магнитный концентрат; **9000/4** — пелитовая валовая; **9001/1** — пелитовая валовая; **9001/2** — алевритовая валовая. «Не обн.» — не обнаружено; «Не опр.» — не определено.

Таблица 5. Парные коэффициенты корреляции между основными минералами и группами микроэлементов в пеплах

Кварц	1							
Плагиоклазы	-0.95	1						
Mg-Fe-Са-силикаты	-0.76	0.53	1					
Щелочные и щелочно-земельные элементы	-0.80	0.85	0.43	1				
Элементы-гидролизаты	-0.94	0.92	0.69	0.82	1			
Лантаноиды	-0.84	0.85	0.52	0.99	0.86	1		
Халькосидерофилы	-0.98	0.90	0.81	0.66	0.88	0.70	1	
Полу- и неметаллы	-0.64	0.38	0.97	0.30	0.51	0.37	0.72	1
Сумма микроэлементов	-0.97	0.93	0.74	0.83	0.99	0.88	0.92	0.58

мельных элементов, а Mg-Fe-Са-силикаты превалируют как концентраторы элементов халькосидерофилов, полу- и неметаллов. Между группами микроэлементов выявляется и собственная система корреляции. Наиболее тесно связаны между собой группы щелочных и щелочно-земельных, гидролизатных и редкоземельных элементов. Халькосидерофильные элементы, полу- и неметаллы теснее связаны между собой, нежели с элементами

ми других групп. Очевидно, что такое расщепление корреляционных связей между микроэлементами обусловлено их разным предпочтением минералов-концентраторов.

На основании полученных данных была рассчитана серия геохимических модулей (табл. 4), позволяющих провести сопоставление исследуемых пеплов с различными типами магматических и осадочных горных пород.

Пеплы с вулканов Ключевского и Камбального довольно однообразно обнаруживают геохимическую толерантность к следующим типам космогеологических субстратов: по Rb/Cs и Zr/Hf – к терригенным породам; Y/Zr, Ni/Co, Cu/Zn, Cu/Sn – к базальтам; As/Sb – к андезитам; Nb/Ta, Th/U, Se/Te – к хондритам (геохимически недифференцированное в земных условиях вещество), La/Yb, Pb/Ag – к хондритам и базальтам. Обобщение этих данных приводит к заключению о том, что вероятность геохимической привязки исследуемых пеплов к первичным субстратам снижается в направлении от базальтов (42 %) к хондритам (33 %), терригенным осадочным породам (17 %) и к андезитам (8 %). Таким образом, плагиоклазовые по фазовому составу пеплы с обоих вулканов обнаруживают тем не менее 75 %-ное геохимическое сродство с недифференцированным в коровых условиях, т. е. глубинным по источнику, магматогенным веществом.

Дополнительную информацию можно получить из анализа хондритнормированных трендов лантаноидов (рис. 8). Проведенный анализ показал, что исследуемые пеплы по форме кривых нормированных концентраций обнаруживают большое сходство с базальтоидными лавами, например, с лавами извержения ТТИ-50, но при этом характеризуются почти на порядок меньшими концентрациями всех лантаноидов. Минимальная концентрация этих микроэлементов зафиксирована в электромагнитном концентрате алевритовой фракции пепла с Ключевского вулкана (№ 9000/3-1) и в алевритовой фракции пепла с Камбального вулкана.

Незначительность Eu аномалии на большинстве кривых и умеренная дифференциация лантаноидов ($La^*/Yb^* = 3-5$) говорят соответственно о слабом проявлении в первичных расплавах фракционирования плагиоклазов и одновременно о существенной реализации фракционирования оливина и клинопироксенов. Обращает на себя внимание некоторый «провес» кривых относительных концентраций

в области средних лантаноидов (Gd–Ho) в пеплах вулкана Камбального, что может говорить о присутствии в этих пеплах роговой обманки.

Очевидно, что в связи с картиной распределения лантаноидов в исследуемых пеплах, имеющих преимущественно плагиоклазовый состав, возникает вопрос об отсутствии на соответствующих кривых достаточно выраженного Eu-максимума. Наш ответ на этот вопрос состоит в том, что факт недостаточного обогащения европием плагиоклазов в пеплах был обусловлен относительно слабым проявлением фракционирования плагиоклазов и конкуренцией со стороны других минералов – естественных концентраторов Eu, например, амфиболов.

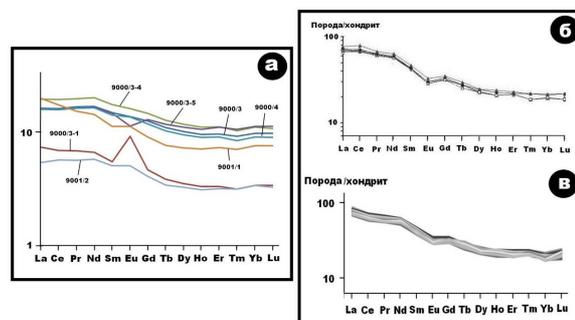


Рис. 8. Хондрит-нормированные тренды лантаноидов в пеплах 2017 г. с вулканов Ключевского и Камбального (а), а также в лавах ТТИ-50 по данным А. О. Вольнец (Вольнец и др., 2013) (б) и А. С. Мяндина (в)

Заключение

Результаты минералого-геохимических исследований пеплов 2017 г. с вулканов Ключевского и Камбального, характеризующихся разными геологическими позициями (Ключевской – Центрально-Камчатская депрессия, Камбальный – юго-восточное окончание Восточно-Камчатского вулканического хребта), позволяют сделать следующие выводы.

Исследованные пеплы несколько различаются по химическому составу: с Ключевского вулкана пепел близок к андезибазальтам, а с Камбального – к андезитам. По нормативно-минеральному составу они на 65–87 % сложены основными плагиоклазами, на 3–22% кварцем, на 6.5–

14 % Mg-Fe-Ca-силикатами (оливином, пироксеном, вероятно, роговой обманкой). При этом пепел с вулкана Камбального отличается несколько более кислым составом плагиоклаза и более высоким содержанием кварца. В качестве акцессорных минералов в пеплах обнаружены шпинелиды (ульвит-магнетит, магнетит, хромит), ильменит, рутил, апатит, циркон, пирит и самородно-металлические фазы (Al, Cu, Fe). Пелитовые фракции относительно алевритовых несколько обогащены кварцем, но обеднены Mg-Fe-Ca-силикатами. По результатам исследований С. Н. Рычагова (Рычагов и др., 2017), в качестве небольшой примеси в пепле Камбального вулкана присутствуют предположительно резургентные по своей природе титанит, андрадит, каолинит и гипс. Однако мы не склонны переоценивать вклад такого материала в пепел с Камбального вулкана, поскольку преимущественно резургентные вулканические пеплы характеризуются гораздо более гетерогенным минеральным парагенезисом. В составе такого парагенезиса основную роль играют минералы не магматического, как в рассматриваемых случаях, а метаморфического и флюидо-гидротермального происхождения (Аникин и др., 2011; Аникин и др., 2018).

Особенное значение имеет факт обнаружения в исследуемых пеплах нитевидных форм абиогенного конденсированного органополимерного вещества CNO-состава. Следует подчеркнуть, что по изотопному составу углерода эти образования тождественны подобным нитям и частицам, выявленным к настоящему времени в продуктах современного вулканизма в Камчатско-Филиппинском островодужном мегапоясе на протяжении 6000 км. Более того, проведенный анализ показал, что в самих пеплах как с Ключевского, так и Камбального вулканов присутствует примесь эндокриптного углеродного вещества, изотопный состав углерода в котором практически совпадает с таковым в органополимерных нитях.

В составе пеплов выявлены 50 микроэлементов, подразделяющиеся на пять групп: щелочные и щелочно-земельные, гидролизатные, лантаноиды, халькосиде-рофилы, полу- и неметаллы. Анализ приводит к заключению, что преимущественно плагиоклазовые по минеральному составу пеплы с обоих вулканов обнаруживают на 75 % геохимическое сродство с недифференцированным в коровых условиях субстратом, т. е. глубинным по источнику веществом. По форме кривых хондритнормированных концентраций лантаноидов пеплы с обоих вулканов близки базальтоидным лавам ТТИ-50. Незначительность Eu-аномалии на большинстве таких кривых и выявляющаяся умеренная дифференциация лантаноидов говорят соответственно о слабом проявлении в первичных расплавах фракционирования плагиоклазов и одновременно существенной реализации фракционирования оливина и пироксенов.

Можно предполагать, что в обоих исследованных нами случаях пеплы были непосредственно связаны с достаточно глубинными магматическими камерами, о чем свидетельствуют их минералогеохимические свойства, гранулометрическая и морфологическая однородность частиц, наличие в пеплах с обоих вулканов значительного содержания свежего вулканического стекла. Как можно предполагать, в начале извержений имел место процесс медленного подъема магматических расплавов с их фракционированием и гравитационным расслоением на нижнюю Mg-Fe-силикатную и верхнюю алюмосиликатную фракции. Частичная эрупция последней происходила в виде пеплов, а оставшаяся масса алюмосиликатного расплава в силу вязкости и склонности к быстрому отвердеванию закупорила магматический канал и тем самым предотвратила лавовое извержение по гавайскому типу.

Авторы благодарят Л. П. Аникина, А. А. Соболеву, Д. Н. Ремизова и А. С. Мяндина за помощь в исследованиях и ценные замечания.

Библиографический список

- Аникин Л. П., Вергасова Л. П., Максимов А. П. и др. Пеплы извержения Корякского вулкана в 2009 г. // Вулканизм и связанные с ним процессы: матер. региональной конференции вулканологов / ИВиС ДВО РАН. Петропавловск-Камчатский, 2011. С. 10–13.
- Аникин Л. П., Силаев В. И., Чубаров В. М. и др. Алмаз и другие акцессорные минералы в продуктах извержения 2008–2009 гг. Корякского вулкана (Камчатка) // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2018. № 2. С. 18–27.
- Башарина Л. А. Водные вытяжки пепла и газы пепловой тучи вулкана Безымянного // Бюллетень вулканологических станций. 1959. № 27. С. 38–42.
- Волынец А. О., Мельников Д. В., Якушев А. И. Первые данные о составе продуктов Трещинного Толбачинского извержения им. 50-летия ИВиС (Камчатка) // Докл. РАН. 2013. Т. 452, № 3. С. 303–307.
- Гирина О. А., Мельников Д. В., Маневич А. Г., Нурдаев А. А. Извержение вулкана Камбальный в 2017 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 2. С. 263–267.
- Гонтовая Л. И., Попруженко С. В., Низкоус И. В. Структура верхней мантии зоны перехода океан-континент в районе Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2010. № 1. С. 3–35.
- Гонтовая А. И., Силаев В. И., Вергасова Л. П. и др. К вопросу о глубинности источника флюидо-магматического вещества под Толбачиком и Ключевским вулканами // Вулканизм и связанные с ним процессы: матер. XX ежегодной научной конференции вулканологов / ИВиС ДВО РАН. Петропавловск-Камчатский, 2017. С. 22–25.
- Карнов Г. А., Силаев В. И., Аникин Л. П. и др. Алмазы и сопутствующие минералы в продуктах Трещинного толбачинского извержения 2012–2013 гг. // Вулканология и сейсмология. 2014. № 6. С. 3–20.
- Карнов Г. А., Силаев В. И., Аникин Л. П. и др. Вулканогенный углеродный парагенезис на Камчатке // История науки и техники, 2017. № 7. С. 66–77.
- Литасов Н. Е., Важеевская А. А. Вулкан Камбальный // Действующие вулканы Камчатки. М.: Наука, 1991. Т. 2. С. 396–405.
- Рудич К. Н. Вулкан Камбальный // Каменные факелы Камчатки. Новосибирск: Наука, 1978. С. 111–112.
- Рычагов С. Н., Сандимирова Е. И., Сергеева А. В., Нурдаев И. А. Состав пепла вулкана Камбальный (извержение 2017 г.) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2017. № 4. Вып. 36. С. 13–27.
- Силаев В. И., Аникин Л. П., Вергасова Л. П. и др. Абиогенные органические полимеры в продуктах современного вулканизма // Вестник Пермского университета. Геология. 2016а. Вып. 3. С. 21–33.
- Силаев В. И., Вергасова Л. П., Васильев Е. А. и др. Микропарагенезис алмаза и самородного алюминия в продуктах современного вулканизма // Вулканология и сейсмология. 2016б. № 1. С. 71–77.
- Силаев В. И., Карнов Г. А., Аникин Л. П. и др. Первая находка природного дюралюминия // Докл. РАН. 2017. Т. 476, № 1. С. 98–101.
- Федотов С. А., Жариков Н. А., Гонтовая Л. И. О вулканической деятельности, магматической питающей системе и глубинном строении вулканов Ключевской группы // Вулканизм и геодинамика: матер. IV Всероссийского симпозиума по вулканологии и палеовулканологии. Петропавловск-Камчатский, 2009. Т.1. С. 24–27.
- Хубуная С. А., Гонтовая Л. И., Москалева С. В. Петрологические особенности андезибазальтов вершинных извержений вулкана Ключевской и сейсмическая модель верхней части земной коры (Камчатка) // Вулканизм и геодинамика: матер. IV Всероссийского симпозиума по вулканологии и палеовулканологии. Петропавловск-Камчатский, 2009. Т.1. С. 215.
- Ponomareva V. V., Churikova T., Melekestsev I. V., Braitseva O. A., Pevzner M., Sulerzhitskii L. Late Pleistocene-Holocene Volcanism on the Kamchatka Peninsula, Northwest Pacific Region // Volcanism and Subduction: The Kamchatka Region. Washington, D. C.: Amer. Geophysical Union, 2007. Vol. 172. P. 165–168.

The Ashes of 2017 from the Klyuchevskoy and Kambalnyy Volcanoes: A Comparative Mineralogical-Geochemical Analysis

V.I. Silaev^a, G.A. Karpov^b, D.V. Kiseleva^c, L.P. Vergasova^b, B.A. Makeev^a, K.V. Tarasov^b, A.F. Khazov^a

^aInstitut Geology Komi SC, Russian Academy of Sciences, 54 Pervomayskaya Str., Syktyvkar 167982, Russia. E-mail: silaev@geo.komisc.ru

^bInstitut of Volcanology and Seismology, Russian Academy of Sciences, 9 Piip Blv., Petropavlovsk-Kamchatsky 683006, Russia. E-mail: karpovga@kscnet.ru

^cInstitute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of RAS, 15 Academician Vonsovsky Str., Ekaterinburg, 620016, Russia. E-mail: podarenka@mail.ru

The results of the mineralogical and geochemical study of the ash of the Klyuchevskoy and Kambalnyy volcanoes located in different geological conditions (Klyuchevskoy – Central Kamchatskaya Depression, Kambalnyy - Southeast end Eastern Kamchatka Volcanic Ridge) were obtained in 2017, and allowed making following conclusions. The investigated ashes differ somewhat in chemical composition: the Klyuchevskoy volcano ash is close to andesibasalts, but that from Kambalnyy is close to andesites. According to the normative-mineral composition, they are composed of 65–87% basic plagioclases, 3–22% quartz, 6.5–14% Mg-Fe-Ca silicates (olivine, pyroxene, probably hornblende). In this case, the ashes from the volcano Kambalnyy are characterized by more acidic composition of plagioclase and higher content of quartz. The accessory minerals found in the ashes are presented by spinels (Ulviya magnetite, magnetite, and chromite), ilmenite, rutile, apatite, zircon, pyrite and native metallic-phase (Al, Cu, Fe). Pelitic (silty) fractions are enriched in quartz, but impoverished in Mg-Fe-Ca silicates. As a small admixture in the ash of the Cumulus volcano, titanite, andradite, kaolinite and gypsum are inherently resurgent. The fact of detecting the filamentous forms of abiogenic condensed organopolymer substance of CNO composition in the investigated ashes is of particular importance. It should be noted that, according to the isotope composition of carbon, these formations are identical to similar threads and particles identified in products of modern volcanism in the Kamchatka-Philippine island arc megabelt. Moreover, the analysis showed the presence in the ashes of the Klyuchevskoy and Kambalnyy volcanoes of the carbon substance, which carbon isotopic composition practically coincides with that in the organic filaments. Ashes contain 50 microelements divided into five groups: alkaline and alkaline earth, hydrolyzed, lanthanides, chalcocericophilic, semi- and non-metals. The analysis leads to the conclusion that the predominantly plagioclase containing ash from both volcanoes show a 75% geochemical similarity to the deep source matter. According to the shape of the curves of chondritotropic concentrations of lanthanides, the ashes from both volcanoes are close to the basaltic lavas of TTI-50. The insignificance of the Eu anomaly on the most curves and the apparent moderate differentiation of the lanthanides indicate that the fractionation of plagioclases in the primary melts and the significant realization of the fractionation of olivine and pyroxenes are weak. Based on the granulometric and morphological homogeneity of particles and the presence of a significant content of fresh volcanic glass in ash from both volcanoes, it can be assumed that in both cases the ashes were predominantly or largely melt-formed, and primarily associated with deep magmatic chambers. It is supposed that the process of slow rise of magmatic melts with their frac-

tionation and gravitational stratification into the lower Mg-Fe-silicate and upper aluminosilicate parts took place. Last eruption of the aluminosilicate substrate occurred in the ash form. Because of the viscosity and tendency to quick solidification, aluminum silicate magmatic magma plugged the channel thus preventing the eruption of the lava Hawaiian type.

Key words: *volcanoes, Klyuchevskoy, Kambalnyy, ash, chemical and mineral composition, impurity elements, abiogenic organopolymers.*

References

- Anikin L.P., Vergasova L.P., Maksimov A.P. et al. 2011. Peply izverzheniya Koryakskogo vulkana v 2009 g. [The ashes of the Koryakskiy volcano 2009 eruption]. *In: Vulkanizm i svyazannye s nim protsessy. Petropavlovsk-Kamchatskiy: IViS DVO RAN*, pp. 10–13. (in Russian)
- Anikin L.P., Silaev V.I., Chubarov V.M., Petrovskiy V.A., Vergasova G.A., Sokorenko A.V., Ovsyannikov A.A., Maksimov A.P. 2018. Almaz i drugie aktsessornye mineraly v produktakh izverzheniya 2008–2009 gg. Koryakskogo vulkana (Kamchatka) [Diamond and other accessory minerals in the 2008-2009 eruption products of the Koryak volcano (Kamchatka)]. *Vestnik IG Komi NC UrO RAN*. 2:18–27. (in Russian)
- Basharina L.A. 1959. Vodnye vytyazhki pepla i gazy peplovoy tuchi vulkana Bezymyannogo [Water extracts of ash and gases from ash cloud of the Bezymyanny volcano]. *Bulleten vulkanologicheskikh stantsiy*. 27:38–42. (in Russian)
- Volynets A.O., Melnikov D.V., Yakushev A.I. 2013. Pervye dannye o sostave produktov Treshchinnogo Tolbachinskogo izverzheniya im. 50-letiya IViS (Kamchatka) [The first data on the composition of the products of the Fissure Tolbachinsky eruption named after. 50th Anniversary of IViS (Kamchatka)]. *Doklady RAN*. 452(3):303–307. (in Russian)
- Girina O.A., Melnikov D.V., Manevich A.G., Nuzhdaev A.A. 2017. Izverzhenie vulkana Kambalnyy v 2017 [The eruption of the Kambalnyy volcano in 2017]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 14(2):263–267. (in Russian)
- Gontovaya L I., Popruzhenko S.V., Nizkous I.V. 2010. Struktura verkhney mantii zony perekhoda okean-kontinent v rayone Kamchatki [Structure of the upper mantle of the ocean-continent transition zone in the Kamchatka region]. *Vulkanologiya i seismologiya*. 1:3–35. (in Russian)
- Gontovaya A I., Silaev V.I., Vergasova L.P. et al. 2017. K voprosu o glubinnosti istochnika flyuido-magmaticheskogo veshchestva pod Tolbachikom i Klyuchevskim vulkanami [On the depth of the fluid-magmatic substance source under Tolbachik and Kliuchevskoy Volcanoes]. *In: Vulkanizm i svyazannye s nim processy. Materialy XX ezhegodnoy nauchnoy konferentsii vulkanologov. Petropavlovsk-Kamchatskiy, IViS*, pp. 22–25. (in Russian)
- Karpov G.A., Silaev V.I., Anikin L.P. et al. 2014. Almazы i sopushtvuyushchie mineraly v produktakh Treshchinnogo Tolbachinskogo izverzheniya 2012–2013 gg. [Diamonds and associated minerals in the products of the Fissure Tolbachinskiy Eruption 2012-2013]. *Vulkanologiya i seismologiya*. 6:3–20. (in Russian)
- Karpov G.A., Silaev V.I., Anikin L.P. et al. 2017. Vulkanogennyy uglerodnyy paragenезis na Kamchatke [Volcanogenic carbon paragenesis in Kamchatka]. *Istoriya nauki i tekhniki*. 7: 66–77. (in Russian)
- Litasov N.E., Vazheevskaya A.A. 1991. Vulkan Kambalnyy: nauchnoe izdanie [Kambalny volcano: a scientific publication]. *In: Deystvuyushchie vulkany Kamchatki, T. 2, Moskva, Nauka*, pp. 396–405. (in Russian)
- Rudich K.N. 1978. Vulkan Kambalnyy [Kambalny Volcano]. *In: Kamennye fakely Kamchatki. Novosibirsk, Nauka*, pp. 111–112. (in Russian)
- Rychagov S.N., Sandimirova E.I., Sergeeva A.V., Nuzhdaev I.A. 2017. Sostav pepla vulkana Kambalnyy (izverzhenie 2017 g.) [Composition of the ashes of the volcano Kambalnyy (2017 eruption)]. *Vestnik KRAUNC. Nauki o Zemle*, 4(36):13–27. (in Russian)
- Silaev V.I., Anikin L.P., Vergasova L.P. et al. 2016a. Abiogennyie organicheskie polimery v produktakh sovremennogo vulkanizma [Abiogenic organic polymers in products of modern volcanism]. *Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya*, 3(32):21–33. (in Russian)

- Silaev V.I., Vergasova L.P., Vasilyev E.A. et al.* 2016b. Mikroparagenezis almaza i samorodnogo alyuminiya v produktakh sovremennogo vulkanizma [Microparagenesis of diamond and native aluminum in products of modern volcanism]. *Vulkanologiya i seysmologiya*. 1: 71–77. (in Russian)
- Silaev V.I., Karpov G.A., Anikin L.P. et al.* 2017. Pervaya nakhodka prirodnogo dyuralyumiya [The first find of natural duraluminum]. *Doklady RAN*. 476(1):98–101. (in Russian)
- Fedotov S.A., Zharikov N.A., Gontovaya L.I.* 2009. O vulkanicheskoy deyatelnosti, magmaticheskoy pitayushchey sisteme i glubinnom stroenii vulkanov Klyuchevskoy gruppy [About volcanic activity, igneous feeding system and deep structure of volcanoes of the Klyuchevskaya group]. *In: Vulkanizm i geodinamika. Materialy IV Vserossiyskogo simpoziuma po vulkanologii i paleovulkanologii*, T.1, Petropavlovsk-Kamchatskiy, pp. 24–27. (in Russian)
- Khubunaya S.A., Gontovaya L.I., Moskaleva S.V.* 2009. Petrologicheskie osobennosti andezibazaltov vershinnykh izverzheniy vulkana Klyuchevskoy i seysmicheskaya model verkhney chasti zemnoy kory (Kamchatka) [Petrologic features of andesibasalts of vertex eruptions of Klyuchevskoy volcano and seismic model of the upper part of the earth's crust (Kamchatka)]. *In: Vulkanizm i geodinamika. Materialy IV Vserossiyskogo simpoziuma po vulkanologii i paleovulkanologii*. Petropavlovsk-Kamchatskiy, T.1, pp. 215. (in Russian)
- Ponomareva V.V., Churikova T., Melekestsev I.V., Braitseva O.A., Pevzner M., Sulerzhitsky L.* 2007. Late Pleistocene-Holocene Volcanism on the Kamchatka Peninsula, Northwest Pacific Region. *In: Volcanism and Subduction: The Kamchatka Region*, V. 172, Washington, D. C., Amer. Geophysical Union, pp. 165–168. doi: 10.1029/172GM15