

УДК 551.214

ГЕОХИМИЯ И ПОТЕНЦИАЛЬНОЕ ПЛОДОРОДИЕ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ПЕПЛОВ ИЗВЕРЖЕНИЙ ВУЛКАНОВ АЛАИД И ЭБЕКО (КУРИЛЬСКИЕ ОСТРОВА)

© 2021 г. Л. В. Захарихина^а, *, В. А. Рашидов^б, **, Л. П. Аникин^б, ***

^аФедеральный исследовательский центр “Субтропический научный центр Российской академии наук”, ул. Яна Фабрициуса, 2/28, Сочи, Краснодарский край, 354002 Россия

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

*e-mail: zlv63@yandex.ru

**e-mail: rashidva@kscnet.ru

***e-mail: alp@kscnet.ru

Поступила в редакцию 02.11.2020 г.

После доработки 29.12.2020 г.

Принята к публикации 17.06.2021 г.

Установлены общие особенности элементного состава пеплов извержений курильских вулканов Алаид и Эбеко. В пеплах устойчиво превышены концентрации К, Вi, U, Cs, Th, Na, Yb относительно средних содержаний для соответствующих типов вулканитов. В состав дефицитных элементов ($K_k < 1$) входят: Mg, Ag, Sn, Nb, Ta, Ni, Sr. Из рассмотренного спектра пеплов разных вулканов п-ва Камчатка (Ключевской, Толбачик, Ксудач, Безымянный, Корякский, Шивелуч, Кизимен) наиболее близки по элементному составу к пеплам изученных вулканов Курильских островов продукты извержений вулканов Шивелуч и Кизимен. Пеплы вулканов Алаид и Эбеко отличаются от большинства пеплов вулканов Камчатки повышенными содержаниями радиоактивных элементов (U, Th). Установлен сравнительно высокий потенциал биологической продуктивности пеплов курильских вулканов. Рассмотренный показатель потенциального плодородия (ППП) в сравнении с самым продуктивным пеплом п-ова Камчатка, для которого ППП принят за единицу, составляет для пеплов вулканов Алаид и Эбеко 0.72 и 0.66 единиц соответственно. Наблюдается выдержанная зависимость ППП от содержания в пеплах кремния: чем выше основность пеплов, тем больше их потенциальное плодородие. Впервые обнаружен эффект фракционирования редкоземельных элементов, проявляющийся во всех изученных вулканических пеплах (как Курильских островов, так и Камчатки) в виде положительной европиевой аномалии с величиной E/E_r^* от 1.2 до 1.8 единиц. При оценке элементного состава поверхностных вод ручья, протекающего по вулкану Эбеко, не обнаружено тенденции активного перехода в природные растворы радиоактивных элементов из пеплов. Сравнительный анализ вод этого ручья с водотоками окрестностей изученных вулканов Камчатки показал, что связь их составов в большей степени определяет временной фактор. Водотоки вблизи разных вулканов в момент извержения обнаруживают сходство, а в их воды при пеплопадах очень активно переходят редкоземельные элементы (РЗЭ), их содержания в ручьях превышают средние содержания РЗЭ для пресных вод континентов на два порядка. По завершении вулканического события связь геохимических составов вод в ареалах выпадения пеплов разных вулканов ослабевает. Воды мелких водотоков вблизи вулканов во время извержений можно рассматривать как природные жидкие удобрения, содержащие РЗЭ.

Ключевые слова: вулканические пеплы, Алаид, Эбеко, элементный состав

DOI: 10.31857/S0203030621050072

ВВЕДЕНИЕ

Характеристика элементного состава вулканических пеплов важна не только для понимания особенностей генезиса вулканизма, изучения геохимии продуктов вулканизма, но и актуальна для анализа особенностей процессов их влияния на формирование компонентов окружающей сре-

ды, территорий, расположенных как в ближайших окрестностях вулканов, так и на существенном удалении от них.

Вулканические пеплы, поступающие при извержениях, формируют обширные регионы с развитыми на них специфическими почвами (*andosols*) [Shoji et al., 1993] или вулканическими почвами

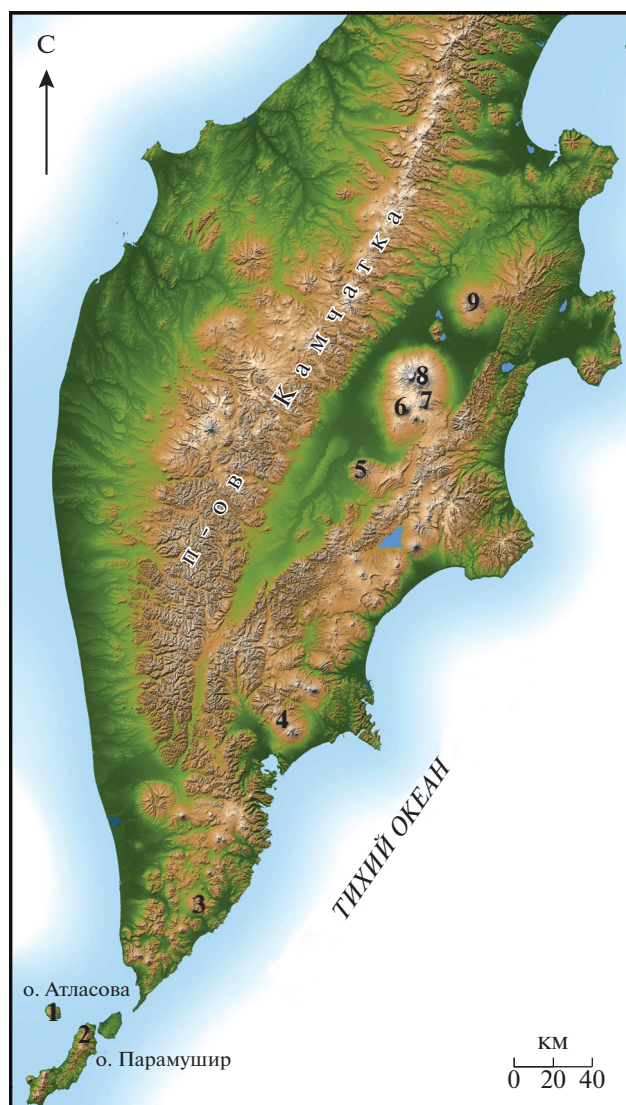


Рис. 1. Местоположение изученных вулканов.
1 – Алаид, 2 – Эбеко, 3 – Ксудач, 4 – Корякский, 5 – Кизимен, 6 – Толбачик, 7 – Безымянный, 8 – Ключевской, 9 – Шивелуч.
При построении использована схема: <https://photojournal.jpl.nasa.gov/jpeg/PIA03374.jpg>

[Соколов, 1973], характеризующимися химическими и минералогическими особенностями, отличными от других почв. На этих почвах произрастает растительность, состав которой также обусловлен деятельностью вулканов [Захарихина, Литвиненко, 2019a]. Газовые выбросы вулкана влияют на специфику атмосферы вблизи вулканов [Павлюткин, Чекрыжев, 2010]. Легкоподвижные формы химических элементов пеплов определяют состав природных растворов [Малик, 2019] и водотоков в окрестностях вулканов, особенно в период извержений [Литвиненко, Захарихина, 2020], а также влияют на продуктивность фитопланктона этих вод [Лепская,

1993]. Кроме того, важны вопросы о потенциальном плодородии вулканических пеплов, поставляющих химические элементы в почвы и увеличивающих их биопродуктивность после извержений [Захарихина и др., 2020].

Безусловно, наиболее актуальны знания о геохимии компонентов природной среды вблизи активно действующих вулканов с точки зрения ее возможного воздействия на состояние здоровья людей, проживающих в населенных пунктах, расположенных в ареалах поступления продуктов вулканизма.

Изучение элементного состава пеплов действующих вулканов Курильских островов – Алаида и Эбеко, оценка их потенциального плодородия и влияния на формирование поверхностных вод является целью настоящих исследований.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объекты

Действующие вулканы Алаид и Эбеко расположены в северной части Курильской островной дуги (рис. 1).

Алаид – самый высокий и один из наиболее активных вулканов Курильской островной дуги расположен на о. Атласова, а извергающийся уже четыре года вулкан Эбеко – на о. Парамушир.

Пеплы вулкана Алаид отобраны на его вершине со снежного покрова во время извержения 27.10.2012 г. [Рашидов и др., 2012] (рис. 2a). Продукты извержения вулкана Эбеко выброса 29.07.2018 г. опробованы в районе сейсмостанции “Северо-Курильск”, расположенной в г. Северо-Курильск, с поверхности крупнотравной растительности (белокопытник японский) (см. рис. 2б) [Рашидов, Аникин, 2018]. Водные пробы ручья без названия (б/н), разгружающегося на юго-восточном склоне вулкана Эбеко, отбирались также во время извержения вулкана в конце июля 2018 г.

Методы и статистическая обработка

Валовые содержания 64 химических элементов в вулканических пеплах установлены с применением количественных методов – масс-спектрометрическим и атомно-эмиссионным анализами с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS и ICP-AES). Использована аттестованная методика НСАМ № 499-АЭС/МС “Определение элементного состава горных пород, почв, грунтов и донных отложений атомно-эмиссионным с индуктивно связанной плазмой и масс-спектральным с индуктивно связанной плазмой методами”. Аппаратура: масс-спектрометр с индуктивно-связанной плазмой Elan-6100 (“Perkin Elmer”, США); атомно-эмиссионный с индуктивно-связанной плазмой спектрометр Optima-4300 DV (“PerkinElmer”, США).

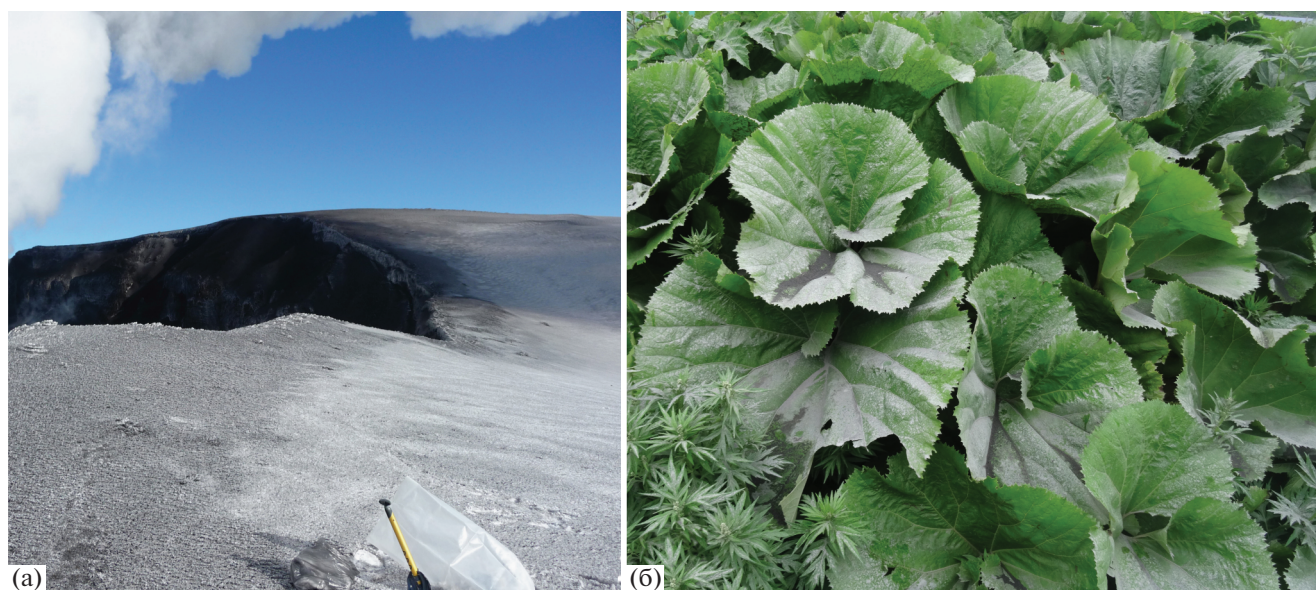


Рис. 2. Пепел вулкана Алайд на кромке его кратера 27.10.2012 г. (а) и пепел вулкана Эбеко на листьях белокопытника японского в районе сейсмостанции “Северо-Курильск” 29.07.2018 г. (б).

Выполнялась процедура разложения образцов в открытой системе с использованием смеси кислот: HF , HNO_3 , HCl и HClO_4 . Химический выход всех определяемых элементов при таком способе разложения, как правило, составляет 90–100%. Погрешность определения химических элементов при использовании данных методов и применения внешнего стандарта $\leq 6\%$. Пределы обнаружения метода для почв – сотые доли микрограмм на грамм (мкг/г) для микроэлементов. Для макрокомпонентов – сотые доли %. Использованная методика разложения и последующего анализа полученного раствора методами ICP-MS + ICP-AES подробно описана в работе [Карандашев и др., 2007]. Исследования химического состава вод ручья б/н, протекающего по вулкану Эбеко, на 70 химических элементов проводились количественными методами – масс-спектрометрическим и атомно-эмиссионным анализами с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS и ICP-AES).

Выполнен расчет кларков концентрации элементов (K_k) для пеплов: $K_k = C_i/K$ [Саеи и др., 1990], где C_i – содержания элементов для исследуемого пепла, K – средние содержания для вулканитов соответствующего состава [Григорьев, 2003].

В настоящей работе рассматривается весь диапазон значений $K_k < 1 \dots K_k > 1$, где $K_k > 1$ – избыточные элементы, $K_k < 1$ – дефицитные химические элементы. По величине K_k построены геохимические формулы для пеплов путем ранжирования химических элементов по данному показателю. Над чертой помещены элементы, концентрации которых превышают их распространенность в вулка-

нитах соответствующего состава или близки к ним (далее избыточные элементы с $K_k \geq 1$). Под чертой приведены элементы, дефицитные относительно этой величины ($K_k < 1$).

Для сравнительного анализа составов пеплов вулканов Северных Курил и Камчатки выполнен расчет ранговых коэффициентов корреляции между ними по показателям K_k .

Для вод ручья б/н рассчитан кларк концентрации по формуле $K_k = C_i/K_b$, где C_i – концентрация химического элемента в пробе воды, K_b – его среднее содержание в речной воде [Виноградов, 1967; Гордеев, Лисицын, 1978; Гордеев, 1983].

Для оценки особенностей поведения редкоземельных элементов в исследованных вулканических пеплах содержания РЗЭ нормированы по североамериканскому сланцу (NASC) [Haskin et al., 1968; Gromet et al., 1984], величина Eu аномалии рассчитана по формуле: $Eu_{ан} = Eu_n / (Sm_n \cdot Gd_n)^{1/2}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Валовые содержания химических элементов в пеплах

В результате сравнения средних валовых содержаний элементов в вулканических пеплах извержений вулканов Алайд и Эбеко (табл. 1) с их кларками в соответствующих типах вулканических пород [Григорьев, 2003] были получены приоритетные ряды элементов, ранжированных по величине K_k (в скобках):

пеплы вулкана Алаид – К (1.97), Bi (1.44), Cu (1.43), Sr (1.31), V (1.25), P (1.24), U (1.21), Na (1.14), Th (1.01), Al (0.97), Be (0.95);

Cd (0.93), Cs (0.92), Zn (0.90), Yb (0.86), Mn (0.83), Ba (0.82), Zr (0.80), Ca (0.78), Er (0.78), Co (0.78), Pr (0.76), Gd (0.76), Nd (0.76), Rb (0.75), Sm (0.75), Eu (0.73), Fe (0.73), Ti (0.73), Hf (0.72), Mo (0.71), Sc (0.70), Ga (0.70), Y (0.68), Tm (0.68), Ce (0.65), Dy (0.65), Lu (0.63), La (0.62), Tb (0.60), Li (0.60), Ag (0.51), Ho (0.51), Nb (0.48), Mg (0.45), Pb (0.43), Ta (0.36), W (0.35), Sn (0.26), As (0.23), Ni (0.16), Sb (0.09), Cr (0.05), S (0.03);

пеплы вулкана Эбеко – S (5.14), K (1.96), Bi (1.92), U (1.51), Cs (1.43), Th (1.35), Sb (1.21), As (1.20), Mo (1.08), Na (1.01), Yb (0.98), Pb (0.97);

Cu (0.96), Zn (0.93), V (0.92), Ba (0.88), Mn (0.86), Al (0.86), Zr (0.84), Er (0.83), Hf (0.83), Sr (0.82), Rb (0.78), Li (0.71), Tm (0.78), Sc (0.75), Lu (0.74), Y (0.74), P (0.72), Cd (0.72), Gd (0.70), Co (0.69), Fe (0.68), Dy (0.67), Be (0.66), Pr (0.66), Sm (0.66), Nd (0.65), Ca (0.60), Tb (0.59), Eu (0.58), Ti (0.58), Ga (0.58), W (0.56), Ce (0.54), Ho (0.54), La (0.50), Mg (0.43), Ag (0.38), Sn (0.31), Nb (0.22), Ta (0.18), Ni (0.07), Cr (0.05).

В целом для изученных пеплов вулканов Алаид и Эбеко наблюдаются общие геохимические особенности составов. Ранговый коэффициент корреляции, рассчитанный по показателям K_k пеплов, составляет 0.59 единицы при $r5\%$ крит = 0.282.

К общим особенностям пеплов следует отнести вхождение в спектр приоритетных элементов, имеющих $K_k \geq 1$: K, Bi, U, Cs, Th, Na, Yb. В состав дефицитных в обоих случаях входят: Mg, Ag, Sn, Nb, Ta, Ni, Cr. В пеплах обоих вулканов отмечается также нахождение в средней части приоритетных рядов большинства элементов редкоземельной группы.

Наиболее яркое отличие в пеплах рассматриваемых вулканов состоит в содержаниях S. В пеплах вулкана Эбеко концентрация S превышает кларк для основных пород в 5 раз. В пеплах вулкана Алаид кларк концентрации S составляет 0.03 единицы, и в приоритетном геохимическом ряду элемент расположен на последнем месте. Безусловно, повышенные содержания серы в пеплах Эбеко обусловлены активной фумарольной деятельностью, характерной для этого вулкана.

К отличительным особенностям пеплов следует отнести также высокие содержания в пеплах вулкана Эбеко Sb и As, которые, напротив, являются дефицитными для пеплов вулкана Алаид. При этом последние отличаются повышенными содержаниями фосфора.

Сравнительный анализ составов пеплов вулканов Северных Курил с пеплами вулканов Камчатки

По петрохимическому составу пеплы современных извержений вулканов п-ова Камчатка изменяются от базальтов до дациандезитов. Сравнительный анализ пеплов вулканов Камчатки с продуктами извержений вулканов Северных Курил показал следующие закономерности. Коэффициенты ранговой корреляции (КРК) по K_k для большинства рассмотренных пеплов положительные (табл. 2). Исключение составляют пеплы извержений вулканов Безымянный и Корякский, не имеющие положительной корреляционной связи с пеплами вулканов Алаид и Эбеко.

Связь пеплов вулканов Алаид и Эбеко и вулканов Камчатки не связана с петрохимическим составом продуктов извержений. Наиболее тесные корреляционные зависимости по элементному составу с вулканическими пеплами изученных вулканов Северных Курил обнаруживают пеплы извержений камчатских вулканов Шивелуч и Кизимен. А вот близкие по составу к изученным пеплам курильских вулканов андезибазальтовые продукты извержений вулкана Ксудач и базальтовые пеплы вулкана Безымянный вовсе не обнаруживают положительной связи.

Географическое положение рассматриваемых вулканов также не обнаруживает связи со значениями КРК. Пеплы самых близко расположенных к вулканам Северных Курил камчатских вулканов Ксудач и Корякский (см. рис. 1) не обнаруживают положительной корреляционной связи с пеплами Алаида и Эбеко.

Факторы, определяющие связь (или ее отсутствие) элементных составов пеплов двух регионов, не очевидны. Можно лишь констатировать близость по составу к пеплам вулканов Алаид и Эбеко продуктов извержений камчатских вулканов Шивелуч и Кизимен.

Кроме того, в этой связи можно отметить следующее. Ранее при рассмотрении элементных составов большого спектра не только современных, но и среднеголоценовых пеплов разных вулканов п-ова Камчатка была выявлена одна их общая геохимическая специализация [Захарихина, Литвиненко, 2019б]. Большинство вулканов Камчатки поставляют продукты извержений, для которых характерны избыточные химические элементы, типоморфные для основных вулканических пород (элементы, содержащиеся в основных вулканических породах в больших количествах, чем в кислых). Цитируемыми авторами было высказано предположение о том, что обогащенность наиболее характерных для Камчатки вулканических пеплов химическими элементами, типоморфными для основных горных пород, и обедненность элементами, типичными для кислых вулканических пород, может являться общей геохимической особенностью.

Таблица 1. Кларки (К) средних и основных вулканитов, по [Григорьев, 2007], кларки концентрации (Кк) химических элементов в вулканических пеплах

Элементы	К средних вулканитов	К основных вулканитов	Кк пеплов извержений вулканов								
			Алайд, 2012 г.	Эбеко, 2018 г.	Ключевской, 2008 г.	ТТИ-50, 2012 г.	Ксудач, 1907	Безымянный, 2006 г.	Корякский, 2009 г.	Шивелуч, 2014 г.	Кизимен, 2011 г.
Li	20.00	13.00	0.61	0.72	1.62	1.46	0.5	1.00	0.37	0.65	0.70
Be	1.40	1.20	0.95	0.66	0.48	1.25	0.37	0.39	0.45	0.64	0.59
Na	2.72	1.94	1.14	1.02	1.42	1.30	0.81	0.98	0.93	1.17	0.82
Mg	1.85	3.92	0.45	0.43	0.74	0.37	1.11	1.11	0.91	0.83	0.65
Al	8.83	8.66	0.97	0.86	0.98	0.98	0.9	0.90	0.90	0.96	0.96
P	0.10	0.11	1.24	0.72	—	—	—	—	—	—	—
S	0.07	0.07	0.03	5.14	—	—	—	—	—	—	—
K	1.49	0.77	1.97	1.96	1.19	2.48	0.45	0.78	0.72	1.34	0.84
Ca	4.44	7.20	0.78	0.60	0.74	0.56	1	1.03	0.80	0.80	0.71
Sc	15.00	31.00	0.70	0.75	0.90	0.74	1.55	1.33	1.20	0.66	0.93
Ti	0.46	0.71	0.73	0.58	0.84	1.27	0.86	0.89	0.91	1.30	0.74
V	71.00	220.00	1.25	0.93	2.23	1.45	2.11	4.79	4.37	1.20	1.83
Cr	30.00	130.00	0.05	0.05	0.26	0.04	1.19	0.47	0.73	2.45	0.40
Mn	0.11	0.14	0.83	0.86	0.77	0.72	1.12	0.93	0.57	0.48	0.65
Fe	5.04	8.06	0.73	0.68	0.49	0.69	0.95	0.65	0.61	0.47	0.76
Co	19.00	30.00	0.78	0.70	1.10	0.80	0.86	1.21	1.11	0.63	0.63
Ni	51.00	73.00	0.16	0.07	0.38	0.15	0.25	0.25	0.29	0.52	0.35
Cu	44.00	73.00	1.43	0.96	1.23	2.47	0.74	0.84	0.73	0.88	0.89
Zn	31.00	85.00	0.90	0.93	1.14	1.11	2.11	2.45	2.23	1.95	3.19
Ga	29.00	26.00	0.70	0.58	0.73	0.81	0.6	0.59	0.62	0.66	0.48
As	2.50	2.00	0.23	1.21	0.75	3.70	1.25	0.92	2.32	5.80	0.44
Rb	75.00	43.00	0.75	0.78	0.44	1.51	0.17	0.41	0.31	0.37	0.43
Sr	390.00	440.00	1.31	0.82	1.43	0.77	0.69	1.44	2.33	1.54	0.69
Y	19.00	25.00	0.68	0.74	0.80	1.36	0.85	0.95	0.79	0.55	0.84
Zr	110.00	110.00	0.80	0.84	1.00	4.82	0.91	1.09	0.40	2.05	0.80
Nb	19.00	10.00	0.48	0.22	0.39	0.96	0.1	0.32	0.24	0.18	0.15
Mo	2.00	1.90	0.71	1.08	0.40	1.47	0.62	0.55	2.65	1.63	0.95
Ag	0.10	0.12	0.51	0.38	—	—	—	—	—	—	—
Cd	0.15	0.14	0.93	0.72	1.14	1.21	1.1	0.87	1.13	1.03	1.40

Таблица 1. Окончание

Элементы	К средних вулканитов	К основных вулканитов	Кк пеллов извержений вулканов								
			Алайд, 2012 г.	Эбеко, 2018 г.	Ключевской, 2008 г.	ТТИ-50, 2012 г.	Ксудач, 1907	Безымянный, 2006 г.	Корякский, 2009 г.	Шивелуч, 2014 г.	Кизимен, 2011 г.
Sn	4.50	3.60	0.26	0.31	0.42	0.72	0.34	0.29	0.51	0.34	0.24
Sb	0.20	1.00	0.09	1.22	0.39	7.70	2.93	1.90	1.30	4.70	3.00
Cs	2.90	1.20	0.92	1.43	0.51	1.75	0.3	0.34	0.28	0.38	0.55
Ba	410.00	390.00	0.82	0.88	1.08	1.38	0.54	1.10	1.37	1.12	1.61
La	28.00	19.00	0.62	0.51	1.05	1.05	0.16	0.46	0.46	0.31	0.34
Ce	50.00	43.00	0.65	0.54	0.44	1.56	0.23	0.34	0.32	0.38	0.40
Pr	4.00	4.70	0.76	0.66	0.68	1.51	0.42	0.85	0.78	0.64	0.65
Nd	20.00	21.00	0.76	0.65	0.71	1.48	0.39	0.80	0.65	0.53	0.55
Sm	4.30	5.10	0.75	0.66	0.80	1.45	0.52	0.91	0.72	0.59	0.56
Eu	1.20	1.60	0.73	0.58	0.88	1.31	0.65	1.08	1.00	0.72	0.60
Gd	4.50	5.10	0.76	0.70	0.94	1.61	0.58	0.96	0.69	0.52	0.56
Tb	0.71	0.95	0.60	0.59	0.85	1.16	0.6	0.99	0.69	0.49	0.54
Dy	3.00	5.10	0.65	0.67	0.94	1.31	0.89	1.40	0.93	0.67	0.80
Ho	0.72	1.30	0.51	0.54	0.77	1.00	0.78	1.19	0.76	0.53	0.67
Er	2.10	2.60	0.78	0.84	1.08	1.46	0.82	1.24	0.76	0.52	0.71
Tm	0.40	0.40	0.68	0.78	1.08	1.33	0.65	0.95	0.60	0.41	0.55
Yb	2.00	2.30	0.86	0.98	1.00	1.57	0.87	1.00	0.65	0.60	0.80
Lu	0.32	0.46	0.63	0.74	0.91	1.20	0.84	1.22	0.78	0.53	0.72
Hf	3.60	3.70	0.72	0.84	0.86	1.54	0.44	0.97	0.44	0.90	0.53
Ta	1.00	0.80	0.36	0.18	1.75	0.59	0.32	2.20	1.20	0.21	0.21
W	1.40	1.10	0.35	0.56	0.25	1.36	0.28	0.26	0.33	0.47	0.39
Pb	18.00	11.00	0.43	0.97	0.44	0.68	0.31	0.29	0.89	0.48	0.89
Bi	0.07	0.05	1.44	1.92	1.50	3.00	1.14	2.29	13.00	3.07	3.00
Th	4.10	2.70	1.01	1.35	0.41	0.89	0.17	0.49	0.46	0.34	0.54
U	1.10	0.86	1.21	1.51	0.60	1.98	0.31	0.89	0.59	0.70	1.00

Примечание. “-” – нет данных. Валовые содержания: Se, Rh, Pd, Ir, Pt, Au, Hg, Te – ниже предела обнаружения метода <2.0, 0.07, 0.06, 0.005, 0.005, 0.008, 0.02, 0.004, 0.07 мг/кг соответственно. Размерность кларков вулканитов для Na, Mg, Al, P, S, K, Ca, Ti, Mn, Fe – в %, для остальных элементов – в мг/кг. Исследования выполнены в Аналитическом сертификационном испытательном центре (ООО АСИЦ) ФГУП Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М. Федорова (ВИМС, Москва).

Таблица 2. Коэффициенты ранговой корреляции Кк пеплов вулканов Алаид и Эбеко с пеплами вулканов п-ва Камчатка, $r_{5\% \text{ крит}} = 0.273$

Вулкан, год извержения	Ключевой, 2008 г.	ТТИ-50, 2012 г.	Ксудач, 1907 г.	Безыманный, 2006 г.	Корякский, 2009 г.	Шивелуч, 2014 г.	Кизимен, 2011 г.	Алаид, 2012 г.	Эбеко, 2018 г.
Алаид	0.414	0.328	0.229	0.221	0.179	0.510	0.529	—	0.592
Эбеко	0.305	0.561	0.239	0.248	0.299	0.601	0.650	0.592	—
Состав пепла	Базальтовый		Андези-базальтовый	Андезитовый			Даци-андезитовый	Андези-базальтовый	Андезитовый

стью всего голоценового вулканизма Камчатки. Для пеплов изученных вулканов Курильских островов эта особенность не характерна. Отсутствует она и для наиболее близкого к ним по составу камчатского вулкана Шивелуч (пеплы вулкана Кизимен в этом анализе не рассматривались).

Обращают на себя внимание относительно высокие содержания в пеплах вулканов Алаид и Эбеко радиоактивных элементов: Кк U составляют 1.5 и 1.2, Th — 1.3 и 1.1 единиц соответственно. В этом наблюдается их сходство только с двумя камчатскими вулканами — Шивелуч и Кизимен. В этой связи весьма актуальны исследования, направленные на изучение влияния вулканов Северных Курил на компоненты окружающей среды.

Для большинства пеплов вулканов Камчатки, напротив, характерны низкие содержания радиоактивных элементов [Литвиненко, Захарихина, 2016]. Именно невысокие содержания последних определяют в целом низкий уровень мощности экспозиционной дозы гамма излучения на Камчатке (в среднем 10–11.5 мкР/ч на юге и 8–9.5 мкР/ч на севере).

Поведение редкоземельных элементов в пеплах

Сближает пеплы рассматриваемых вулканов Курильских островов и Камчатки сходное поведение в них редкоземельных элементов (РЗЭ). В большинстве случаев РЗЭ располагаются в средней части приоритетных геохимических рядов, и именно их поведение чаще определяет положительные значения КРК пеплов Курил и Камчатки.

Как известно, РЗЭ характеризуются сходными химическими свойствами и при этом являются хорошими геохимическими индикаторами для классификации и определения условий формирования геологических объектов и в целом природных процессов [Gromet et al., 1984; Aubert et al., 2002]. Определяется это тенденцией однонаправленного поведения РЗЭ в геохимических процессах гипергенеза, обусловленного близостью их химических свойств. При этом учитываются свойства РЗЭ отражать спектр содержаний,

характерный для источника элементов, и испытывать фракционирование по мере изменения условий последующей миграции в природной среде. За счет повышенной чувствительности РЗЭ к изменениям условий среды при смене, к примеру, окислительно-восстановительных условий в группе РЗЭ может происходить фракционирование и проявляться положительные или отрицательные аномалии отдельных элементов, выражающиеся в повышении или понижении их содержаний относительно других элементов группы. Наиболее изучено фракционирование РЗЭ в природных процессах, характерное для элементов с различной атомной массой.

Общую геохимическую специфику рассматриваемых пеплов вулканов Северных Курил и Камчатки определяет сходная, хорошо выдержанная конфигурация спектров, нормированных по североамериканскому сланцу (NASC) [Haskin et al., 1968] концентраций РЗЭ, с устойчивым преобладанием средней и тяжелой групп РЗЭ (рис. 3).

Наиболее ярким элементом схожего поведения РЗЭ является выраженный европиевый максимум, характеризующийся величиной E/E_r* от 1.2 до 1.8 единиц. Европиевая аномалия, обнаруженная в вулканических пеплах, известное явление, но описанное, преимущественно, для горных пород. В последних она проявляется как в дефиците элемента, так и в его избыточных содержаниях в сравнении с другими РЗЭ [Gromet et al., 1984; Aubert et al., 2002]. Существует мнение, что для зоны гипергенеза это явление не характерно [Aubert et al., 2002].

Единой общепринятой гипотезы причины проявления европиевой аномалии не существует, и вопрос остается дискуссионным. Положительные европиевые аномалии объясняют присутствием плагиоклаза или полевых шпатов, которые являются концентратами европия [Gromet et al., 1984; Aubert et al., 2002]. Связывают это явление и с изменением редокс условий и особенностями кислотно-основных свойств элемента. Eu является элементом с переменной валентностью. Eu²⁺ — сильный восстановитель, образует оксид EuO с более сильными основными свой-

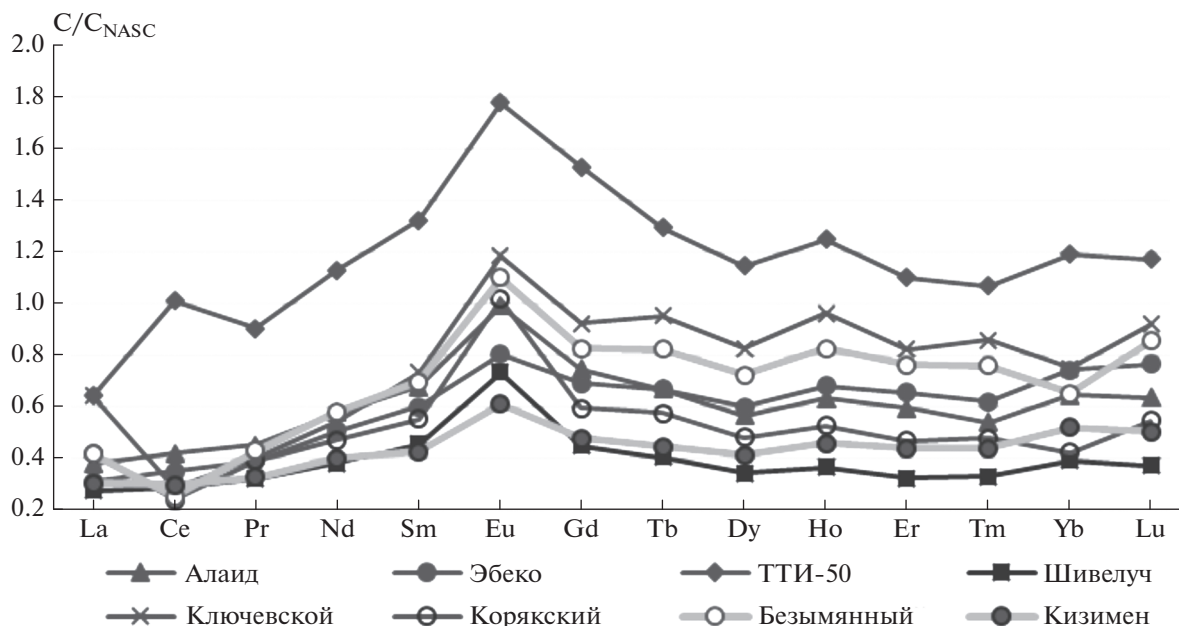


Рис. 3. Спектры концентраций РЗЭ в вулканических пеплах, нормализованные по отношению к северо-американскому сланцу (NASC) [Haskin et al., 1968; Gromet et al., 1984].

ствами. Eu^{3+} дает оксид Eu_2O_3 с более кислыми свойствам [Gromet et al., 1984; Aubert et al., 2002]. Наличие положительных европиевых аномалий в осадочных образованиях объясняют воздействием глубинных гетеротермальных растворов — флюидов внекорового происхождения, обогащенных европием [Шатров, 2006].

Наблюдаемая положительная аномалия Eu в вулканических пеплах может быть обусловлена как условиями генезиса вулканизма в целом, так и сменной окислительно-восстановительных условий при поступлении пеплов на поверхность в раздробленном состоянии. Имеющаяся небольшая выборка вулканических пеплов не позволяет однозначно назвать фактор, определяющий проявление Eu максимума. Обнаруженное явление требует дальнейшего исследования на большем количестве объектов, имеющих разные возрастные характеристики и условия поступления пеплов на поверхность. Возможно, числовые характеристики Eu максимума смогут, наряду с уже имеющимися методами, помочь в решении вопросов генезиса вулканических процессов.

Показатель потенциального плодородия пеплов

До настоящего времени нет единого мнения о пользе или вреде вулканических пеплов при поступлении их на поверхность при вулканических извержениях. Историей известны факты как благотворного влияния пеплов на окружающую среду, так и негативного, когда вулканические события сопровождаются выпадением кислот, гибелью рас-

тительного покрова за счет механического погребения продуктами извержений и при пожарах. Часто после поступления пеплов на поверхность земли наблюдается повышение биопродуктивности экосистем, которое связывают с наиболее очевидной и часто обсуждаемой причиной — привнесением дополнительных элементов питания минерального происхождения с вулканическими пеплами [Андреев, 2015].

В 2014–2018 гг. впервые в международной практике на полях Камчатского института сельского хозяйства (долина р. Авача) были выполнены полевые агрохимические опыты по применению разных вулканических пеплов Камчатки при выращивании культурных растений [Захарихина и др., 2020]. В результате опытных работ были получены существенные прибавки урожайности от 30 до 70% с улучшением биохимических показателей сельскохозяйственной продукции и ее лежкости при хранении. Абстрагируясь от разнообразных деталей результатов этого опыта, можно сделать вывод, что наиболее продуктивны в этом смысле вулканические пеплы, имеющие относительно повышенные валовые содержания широкого спектра элементов.

В этой связи предлагается рассматривать уровень потенциального плодородия вулканических пеплов путем сравнения содержаний в нем химических элементов относительно их концентраций в почве ($\text{ППП} = \sum \text{C}_{\text{вп}}/\text{C}_{\text{пч}}$) (табл. 3). Так как сведений о содержаниях обсуждаемого широкого спектра химических элементов (54 элемента) в почвах Курильских островов нет, для расчета по-

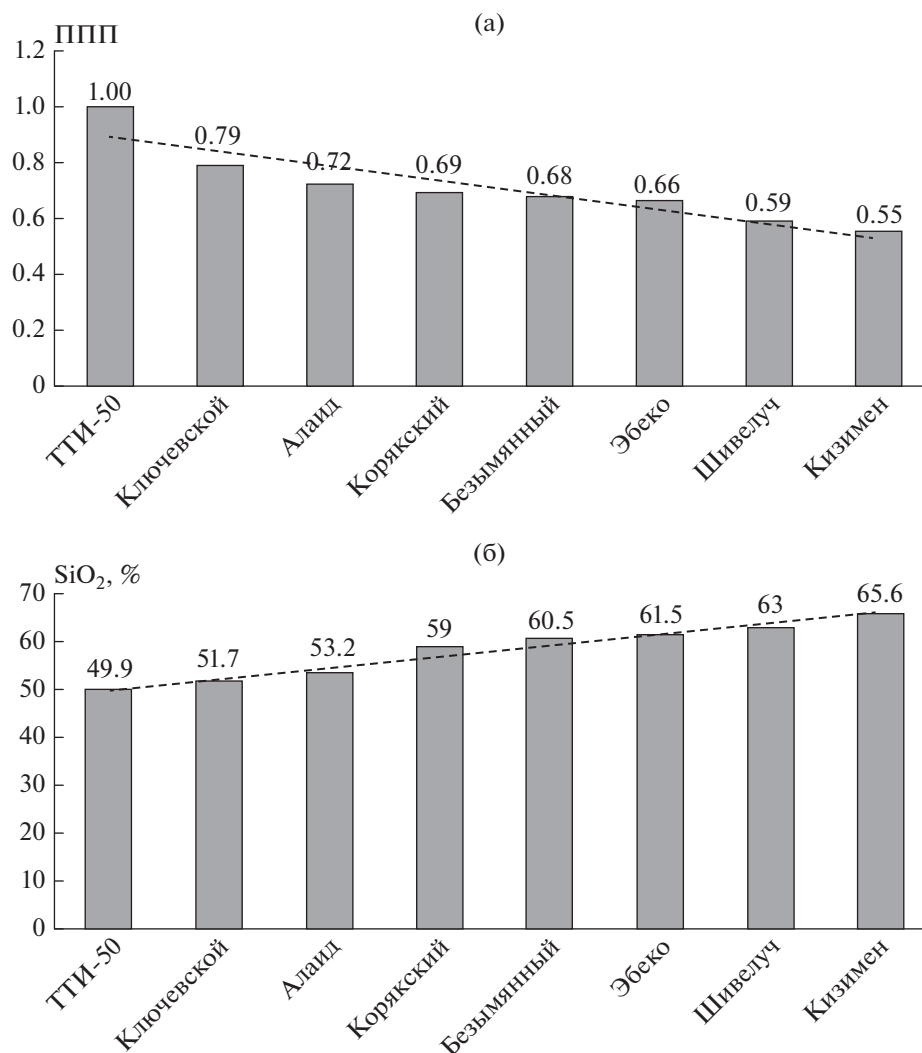


Рис. 4. Показатель потенциального плодородия вулканических пеплов (а) и валовые содержания в них SiO₂ в % (б).

казателя потенциального плодородия (ППП) применяются средние содержания элементов для почв континентов (кларки почв). Из всех рассматриваемых вулканических пеплов самое высокое значение ППП характерно для пепла Трещинного Толбачинского извержения им. 50-летия Института вулканологии и сейсмологии (ТТИ-50). В этой связи величина ППП пепла названного извержения принята за единицу. Для других пеплов ППИ рассматривается как доля от этого значения (рис. 4а).

Обращает на себя внимание высокое расположение в приведенном ряду ППП пепла андезибазальтового состава извержения вулкана Алаид. По обсуждаемому показателю последний уступает только продуктам ТТИ-50 и извержений вулкана Ключевской. Пеплы вулкана Эбеко имеют несколько более низкие значения ППП, но располагаются, однако, близко к пеплам вулкана

Безымянный, показавшим при проведении сельскохозяйственных опытов также очень хорошие результаты (до 70% прибавки урожайности по картофелю).

Оценка основности вулканических пеплов [Максимов и др., 2011; Малик, 2011, 2019; Овсяников, Малик, 2011] обнаруживает обратную зависимость ППП от содержания в них кремния. Чем пепел основнее, тем его показатель потенциального плодородия выше (см. рис. 4б).

В целом, по нашему мнению, можно говорить о близости качественных составов пеплов Северных Курил к андезитовым пеплам камчатских вулканов Шивелуч и Кизимен и сходстве их количественных характеристик по показателю ППП к пеплам базальтовых и андезибазальтовых вулканов п-ва Камчатка: ТТИ-50, Ключевской, Корякский, Безымянный.

Таблица 3. Средние содержания элементов для почв континентов ($K_{\text{почв}}$), по [Ярошевский, 2004], и доли содержания химических элементов в вулканических пеплах относительно $K_{\text{почв}}$

Элементы	$K_{\text{почв}}$	Алай, 2012 г.	Эбеко, 2018 г.	ТТИ-50, 2012 г.	Ключевской, 2008 г.	Корякский, 2009 г.	Безьян- ный, 2006 г.	Шивелуч, 2014 г.	Кизимен, 2011 г.
Li	30.00	0.27	0.31	0.62	0.70	0.24	0.67	0.43	0.47
Be	1.50	0.76	0.54	0.97	0.38	0.42	0.36	0.60	0.55
Sc	8.00	2.71	2.94	2.94	3.50	2.25	2.50	1.23	1.75
V	90.00	3.05	2.11	3.56	5.44	3.44	3.78	0.95	1.44
Cr	60.00	0.11	0.10	0.11	0.57	0.37	0.23	1.23	0.20
Co	9.00	2.59	2.39	2.72	3.67	2.33	2.56	1.33	1.33
Ni	20.00	0.57	0.26	0.60	1.40	0.75	0.65	1.33	0.90
Cu	23.00	4.55	2.80	8.04	3.91	1.39	1.61	1.67	1.70
Zn	60.00	1.27	1.29	1.53	1.62	1.15	1.27	1.01	1.65
Ga	20.00	0.91	0.75	1.08	0.95	0.90	0.85	0.95	0.70
As	6.00	0.08	0.38	1.28	0.25	0.97	0.38	2.42	0.18
Rb	70.00	0.46	0.49	0.93	0.27	0.33	0.44	0.39	0.46
Sr	220.0	2.61	1.60	1.55	2.86	4.14	2.55	2.73	1.23
Y	25.00	0.68	0.75	1.36	0.80	0.60	0.72	0.42	0.64
Zr	300.0	0.29	0.32	1.77	0.37	0.15	0.40	0.75	0.29
Nb	11.00	0.44	0.20	0.89	0.35	0.41	0.55	0.31	0.26
Mo	2.00	0.68	1.07	1.45	0.38	2.65	0.55	1.63	0.95
Cd	0.16	0.81	0.69	1.00	1.00	1.06	0.81	0.97	1.31
Sn	1.10	0.86	0.87	2.23	1.36	2.09	1.18	1.41	1.00
Sb	0.90	0.10	0.44	4.54	0.43	0.29	0.42	1.04	0.67
Cs	3.00	0.37	0.58	0.72	0.20	0.27	0.33	0.37	0.53
Ba	500.0	0.64	0.69	1.08	0.84	1.12	0.90	0.92	1.32
La	40.00	0.30	0.24	0.50	0.50	0.33	0.33	0.22	0.24
Ce	50.00	0.56	0.47	1.35	0.38	0.32	0.34	0.38	0.40
Pr	7.00	0.51	0.44	1.02	0.46	0.44	0.49	0.36	0.37
Nd	33.00	0.48	0.42	0.94	0.45	0.39	0.48	0.32	0.33
Sm	5.00	0.76	0.67	1.48	0.82	0.62	0.78	0.51	0.48

Таблица 3. Окончание

Элементы	K _{почв}	Алайд, 2012 г.	Эбеко, 2018 г.	ТГИ-50, 2012 г.	Ключевской, 2008 г.	Корякский, 2009 г.	Безьян- ный, 2006 г.	Шивелуч, 2014 г.	Кизимен, 2011 г.
Eu	1.00	1.17	0.95	2.10	1.40	1.20	1.30	0.87	0.72
Gd	4.00	0.97	0.90	1.99	1.20	0.78	1.08	0.59	0.63
Tb	0.70	0.81	0.81	1.57	1.16	0.70	1.00	0.49	0.54
Dy	5.00	0.66	0.70	1.33	0.96	0.56	0.84	0.40	0.48
Ho	0.60	1.10	1.18	2.17	1.67	0.92	1.43	0.63	0.80
Er	2.00	1.01	1.12	1.88	1.40	0.80	1.30	0.55	0.75
Tm	0.40	0.68	0.78	1.34	1.08	0.60	0.95	0.41	0.55
Yb	3.00	0.66	0.76	1.22	0.77	0.43	0.67	0.40	0.53
Lu	0.35	0.83	1.00	1.53	1.20	0.71	1.11	0.49	0.66
Hf	7.00	0.38	0.46	0.81	0.46	0.23	0.50	0.46	0.27
Ta	1.00	0.29	0.15	0.48	1.40	1.20	2.20	0.21	0.21
W	1.00	0.38	0.64	1.30	0.27	0.46	0.36	0.66	0.54
Tl	0.30	0.33	1.50	0.82	0.31	1.93	0.90	1.63	0.93
Pb	20.00	0.24	0.47	0.36	0.24	0.80	0.26	0.43	0.80
Bi	0.20	0.36	0.55	0.61	0.38	4.55	0.80	1.08	1.05
Th	6.50	0.42	0.57	0.37	0.17	0.29	0.31	0.22	0.34
U	1.50	0.69	0.89	1.10	0.35	0.43	0.65	0.51	0.73
Na	0.63	3.50	3.03	3.97	4.36	4.00	4.24	5.06	3.53
Mg	0.63	2.80	2.61	2.29	4.59	2.68	3.25	2.43	1.91
Al	7.13	1.17	1.00	1.19	1.19	1.11	1.11	1.19	1.19
K	1.36	1.12	1.08	1.40	0.67	0.79	0.85	1.46	0.92
Ca	1.37	4.11	3.01	2.92	3.91	2.61	3.34	2.60	2.30
Ti	0.37	1.39	1.05	2.43	1.60	1.13	1.10	1.62	0.92
Mn	0.05	2.33	2.33	2.00	2.17	1.24	2.01	1.03	1.41
Fe	0.38	15.44	13.73	14.53	10.49	8.10	8.65	6.26	10.12
ППП		70.24	65.08	97.91	77.25	67.69	66.36	57.54	54.19

Примечание. Размерность кларков почв для Na, Mg, Al, K, Ca, Ti, Mn, Fe – в %, для остальных элементов – в мг/кг.

Влияние пеплов на состав поверхностных вод

Поверхностные воды, формирующиеся в ареалах выпадения вулканических пеплов, отражают не только состав химических элементов максимально быстро переходящих из пеплов в раствор, но также указывают на геохимические особенности обогащения в целом компонентов окружающей среды вследствие вулканических событий. Исследования, выполненные при вулканическом событии ТТИ-50 в ноябре 2013 г., показали, что подавляющая часть (<95%) подвижных форм элементов поступают в природные среды при пеплопадах не в составе пепловых частиц, а в газо- и водорастворенной формах непосредственно из дисперсионной среды вулканического аэрозоля [Литвиненко, Захарихина, 2017]. И именно подвижные формы элементов, быстро переходящие в растворы, меняют состав газовой составляющей, а также геохимические особенности поверхностных вод и почвенно-растительного покрова при извержениях в окрестностях вулкана.

Влияние пеплов на формирующиеся в ареале их выпадения поверхностные воды рассмотрено на примере ручья б/н, разгружающегося на юго-восточном склоне вулкана Эбеко. Оценка элементного состава вод ручья в сравнении со средними содержаниями элементов в пресных речных водах континентов (кларки для пресных вод) показала их геохимические особенности (табл. 4). Существенно обогащены воды ручья б/н всей группой РЗЭ, стоящих в начале гидрогеохимической формулы поверхностных вод (табл. 5): содержания Eu, Ho, Dy, Tb, Gd, Er, Sm, Pr в них превышают кларки для пресных вод на два порядка; концентрации Yb, Nd, Tm, Ce, La повышены в 92, 88, 61, 58 и 36 раз соответственно. К элементам, быстро переходящим в раствор, имеющим $K_k > 10$, следует отнести также Lu, Al, Mn, Co, Fe и S. В состав элементов, K_k для которых составляют более двух единиц, входят Cs, Cu, Y, Au, Ge, V, Hf, Si, Rb, Ca, Sr. Как видно из приведенного перечня, только S и два РЗЭ – Cs и Tb, определяют геохимическую специализацию пеплов извержения вулкана Эбеко.

Обращает на себя внимание вхождение U и Th в ряд дефицитных элементов для вод, в то время как пеплы вулкана Эбеко, как уже было отмечено, ими обогащены. Отсутствие тенденции быстрого перехода в раствор радиоактивных элементов следует рассматривать как положительный фактор формирования экологической обстановки при извержении вулкана.

В целом состав химических элементов, содержащихся в повышенных количествах в пеплах, не повторяет группу элементов, максимально быстро переходящих в природные растворы.

Сравнительный анализ вод ручья с водотоками, формирующимися в ареалах выпадения пеп-

лов вулканов Северной группы п-ова Камчатка (рр. Кабеку, Бильчинок и руч. Студенный), показывает следующие их общие особенности (табл. 6). К главной из них следует отнести быстрый переход в растворы РЗЭ. Во всех рассмотренных ручьях этой зоны элементы редкоземельной группы располагаются в начале гидрогеохимических формул и входят в состав избыточных элементов, максимально быстро переходящих в раствор. Именно их поведение определяет положительные коэффициенты ранговой корреляции K_k всех рассмотренных водотоков.

Вновь подтверждается закономерность отсутствия связи состава химических элементов избыточных для пеплов и группы элементов, активно переходящих в раствор при извержении. Наиболее близки воды ручья б/н, протекающего по вулкану Эбеко, к водам р. Бильчинок. Последние изучались, как и воды руч. б/н вулкана Эбеко, в момент активной вулканической деятельности события ТТИ-50, ареал выпадения пеплов которого располагался в водосборной площади реки. Вероятно, именно временной фактор определяет связь составов поверхностных вод в ареалах вулканических пеплопадов. По завершении вулканического события, когда наиболее подвижная часть химических элементов вымывается из пеплов, связь между водами в ареалах выпадения пеплов разных вулканов ослабевает.

Высокие содержания РЗЭ в поверхностных водах в окрестностях вулканов в момент их извержений указывают не только на геохимическую специфику этих геологических событий. Данное обстоятельство необходимо рассматривать как один из факторов, определяющих всплеск биопродуктивности экосистем в момент извержений. Известно, что РЗЭ в настоящее время активно начали использоваться в сельскохозяйственной практике в качестве микроудобрения [Pahg et al., 2002; Ramos et al., 2016]. Еще в начале 1980-х гг. было установлено благотворное влияние РЗЭ на урожай и качество культурных растений. С этого периода в Китае – стране, обладающей крупнейшими в мире месторождениями РЗЭ, была принята и действует по настоящее время национальная программа по испытанию влияния РЗЭ на рост растений и применению этих элементов в производственном земледелии. Для обработки сельхозугодий употребляется менее 0.2% от содержания РЗЭ в почве, что является экологически безопасным и при этом стимулирует фотосинтез в растениях, способствует развитию их корневой системы, обуславливает существенную прибавку урожайности и повышение качества культурных растений. Интересен тот факт, что величина прибавки урожайности при использовании РЗЭ в Китае (в среднем около 20–40%) совпадает с аналогичными характеристиками упомянутых опытов с вулканическими пеплами

Таблица 4. Кларки речных вод, по [Виноградов, 1967; Гордеев, Лисицын, 1978; Гордеев, 1983], в мкг/л, кларки концентраций (Кк) в водах рек и ручьев, формирующихся в ареалах выпадения вулканических пеплов

Элементы	Кларк	Водотоки, местоположение их истоков									
		р. Студеная, восточный склон вул. Ключевской	р. Кабеку, Восточное подножье вул. Шивелуч	р. Бельчинок, подножье Южного склона вул. Толбачик	руч. б/н, юго-восточный склон вул. Эбеко	Элементы	кларк	р. Студеная, восточный склон вул. Ключевской	р. Кабеку, Восточное подножье вул. Шивелуч	р. Бельчинок, подножье Южного склона вул. Толбачик	руч. б/н, юго-восточный склон вул. Эбеко
Li	2.5	12.40	18.00	1.72	1.23	Ag	0.2	0.75	0.80	0.75	0.50
B	20	37.00	30.50	1.00	3.52	Cd	0.2	0.18	1.70	0.38	0.41
Na	5000	8.40	12.40	1.64	1.77	Sb	1	0.33	1.70	0.15	0.05
Mg	2900	4.14	7.24	3.10	1.27	Cs	0.03	2.47	4.00	9.67	8.29
Al	160	5.06	15.00	93.75	53.77	Ba	30	0.25	1.87	3.10	0.68
Si	6000	2.33	4.00	5.67	2.90	La	0.05	2.60	17.60	60.00	36.46
P _{общ}	40	2.75	8.25	11.25	0.45	Ce	0.08	2.63	18.75	97.50	57.66
S _{общ}	3800	12.63	57.89	1.03	10.40	Pr	0.007	5.29	30.00	157.14	102.7
K	2000	2.15	2.70	1.40	1.10	Nd	0.04	4.25	23.25	130.00	87.89
Ca	12000	1.08	4.25	1.00	2.39	Sm	0.008	4.25	27.50	150.00	110.2
V	1	55.00	30.00	53.00	0.99	Eu	0.001	10.00	57.00	360.00	192.8
Cr	1	1.00	2.20	2.70	1.03	Gd	0.008	5.38	22.50	150.00	113.1
Mn	10	1.20	31.00	23.00	20.1	Tb	0.001	7.40	28.00	190.00	142.2
Fe	40	7.75	20.75	240.00	12.11	Dy	0.005	8.20	26.00	220.00	160.9
Co	0.3	0.63	4.00	22.67	14.90	Ho	0.001	3.00	26.00	220.00	161.7
Ni	2.5	1.04	16.40	6.80	0.98	Er	0.004	7.00	14.50	157.50	112.3
Cu	7	0.57	6.71	12.00	7.29	Tm	0.001	3.00	9.90	82.00	60.70
Zn	20	0.50	1.15	3.60	0.65	Yb	0.004	4.00	13.25	140.00	92.25
Ga	0.1	2.10	6.60	38.00	1.00	Lu	0.001	3.00	9.10	89.00	56.10
Ge	0.07	0.69	0.91	4.29	5.10	Hf	0.0034	2.94	14.71	6.76	2.94
As	2	1.45	7.00	0.31	0.12	W	0.003	22.33	83.33	3.33	1.13
Br	20	4.90	6.00	0.36	1.99	Au	0.0003	1.00	1.00	1.00	5.67
Rb	2	2.10	4.10	2.95	2.39	Tl	1	0.01	0.03	0.04	0.19
Sr	50	0.92	4.80	1.78	2.24	Pb	1	1.90	2.00	2.70	0.31
Y	0.7	0.27	0.87	7.14	5.80	Th	0.1	0.08	0.28	2.70	0.05
Zr	2.6	0.17	0.62	0.54	0.00	U	0.5	0.58	0.38	0.28	0.47
Mo	1	3.80	24.00	0.81	0.03						

Примечание. Содержание Sc, Ti, Ru, Rh, Pd, In, Sn, Te — ниже предела обнаружения анализа <2.0, 5.0, 0.002, 0.005, 0.006, 0.003, 0.04, 0.1 соответственно. Исследования выполнены в Аналитическом сертификационном испытательном центре (ООО АСИЦ) ФГУП Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М. Федорова (ВИМС, Москва).

Таблица 5. Содержания химических элементов для речных вод окрестностей вулканов в сравнении с общими содержаниями элементов для пресных речных вод континентов (в скобках значения Кк)

Водоток, вулкан	Гидрогеохимическая формула поверхностных вод			
	Кк > 100	100 < Кк > 10	100 < Кк > 10	Кк < 1
руч. б/н, Эбеко	Eu(193), Ho(162), Dy(161), Tb(142), Gd(113), Er(112), Sm(110), Pr(103)	Yb(92), Nd(88), Tm(61), Ce(58), Lu(56), Al(54), La(36), Mn(20), Co(15), Fe(12), S(10)	Cs(8.3), Cu(7.3), Y(5.8), Au(5.7), Ge(5.1), B(3.5), Hf(2.9), Si(2.9), Rb(2.4), Ca(2.4), Sr(2.2), Br(2.0), Na(1.8), Mg(1.3), Li(1.2), K(1.1), Cr, Ga(1.0)	V(0.99), Ni(0.97), Ba(0.68), Zn(0.65), Ag(0.5), U(0.47), P(0.45), Cd(0.41), Pb(0.31), Tl(0.19), As(0.12), Sb(0.05), Th(0.05), Mo(0.03), Zr(0.01)
р. Кабеку, Шивелуч	–	W(83), S(58), Eu(57), Mn(31), V, Pr, B(30), Tb(28), Sm(27), Dy, Ho(26), Mo(24), Nd(23), Gd(22), Fe(21), Ce(19), Li(18), La(17), Ni(16), Al(15), Hf(15.0), Er(14), Yb(13), Na(12), Tm(10)	Lu(9), S(8), Mg, As(7), Cu, Ga(7), Br(6), Sr(5), Ca, Rb, Si, Co, Cs(4), K(3), Cr, Pb(2), Ba(1.9), Cd, Sb(1.7), Zn, Au, Ge (1.0)	Ge, Y(0.9), Ag(0.8), Zr(0.6), U(0.4), Th(0.3), Tl(0.03)
руч. Студеный, Ключевской	–	V(55), B(37), Li(12), W(22), S(13), Eu(10)	Na(8.4), Dy(8.2), Fe(7.7), Tb(7.4), Er(7.0), Gd(5.4), Pr(5.3), Al(5.1), Br(4.9), Nd, Sm(4.2), Mo(3.8), Ho, Tm, Lu (3.0), Hf(2.9), P(2.7), Ce, La(2.6), Cs(2.5), Si(2.3), K(2.2), Rb, Ga(2.1), Pb(1.9), As(1.4), Mn(1.2), Ca(1.1), Cr, Au(1.0)	Sr(0.9), Ag, Ge(0.7), Co, U, Cu(0.6), Zn(0.5), Sb, Y, Ba(0.3), Cd, Zr(0.2), Th(0.08), Tl(0.01)
р. Бельчинок, Толбачик	Eu(360), Fe(240), Dy(220), Ho(220), Tb(190), Er(158), Pr(157), Sm, Gd(150), Yb(140), Nd(130)	Ce(97), Al(94), Lu(89), Tm(82), La(60), V(53), Ga(38), Mn(23), Co(23), Cu(12), P(11), Cs(10)	Cs(9.7), Y(7.1), Ni(6.8), Hf(6.8), Si(5.7), Ge(4.3), Zn(3.6), W(3.3), Mg(3.1), Ba(3.1), Rb(2.9), Cr, Pb, Th(2.7), Sr(1.8), Li(1.7), Na(1.6), K(1.4), S, Ca < Au, B(1.0)	Mo(0.8), Ag(0.7), Zr(0.5), Cd(0.4), Br, As(0.3), U(0.3), Sb(0.2), Tl(0.04)

Примечание. Местоположение истоков водотоков приведено в табл. 4.

Таблица 6. Коэффициенты ранговой корреляции Кк ручья б/н, протекающего по вулкану Эбеко (период извержения, август 2018 г.), и водотоков, формирующихся в зоне воздействия пеплопадов Северной группы вулканов Камчатки (период извержения ТТИ-50, ноябрь 2012 г.), $r_{5\%}$ крит = 0.271

Водотоки	р. Кабеку	руч. Студеный	р. Бельчинок
Коэффициенты ранговой корреляции	0.559	0.505	0.828
Вулканы, пеплы которых влияют на состав вод	Шивелуч	Ключевской	Толбачик

Камчатки, выполненными в 2014–2018 гг. на полях Камчатского института сельского хозяйства. Возможно, именно РЗЭ являются основным фактором наблюдаемого всплеска биопродуктивности после выпадения вулканических пеплов.

Воды мелких водотоков вблизи вулканов во время извержений можно рассматривать как природные жидкие удобрения, содержащие РЗЭ. Использование эти природных растворов для полива сельскохозяйственных растений с целью их подкормки РЗЭ должно не только повышать урожайность, но и благотворно влиять на качество выращиваемых культур. В этой связи актуальна постановка полевых (деляночных) и производственных сельскохозяйственных опытов для установления способов и доз внесения природных жидких удобрений вулканического происхождения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Пеплы извержений вулканов Алаид и Эбеко имеют сходные геохимические особенности, выражающиеся в составе избыточных элементов (К, Вi, U, Cs, Th, Na, Yb) и дефицитных (Mg, Ag, Sn, Nb, Ta, Ni, Cr). Отличает продукты извержений двух вулканов существенная обогащенность пеплов вулкана Эбеко S (Кк < 5), а также Sb и As и высокие содержания Р в пеплах вулкана Алаид.

Наиболее тесные корреляционные зависимости элементного состава пеплов вулканов Северных Курил с продуктами извержений вулканов п-ва Камчатка (Ключевской, Толбачик (ТТИ-50), Ксудач, Безымянный, Корякский, Шивелуч, Кизимен) имеют пеплы вулканов Шивелуч и Кизимен. Сближает все изученные вулканические пеплы двух регионов сходное поведение в них РЗЭ. Последние, в основном, располагаются в средней части приоритетных геохимических рядов, характеризуются устойчивым преобладанием средней и тяжелой групп РЗЭ и выраженным европиевым максимумом с величиной E/Eг* от 1.2 до 1.8 единиц.

Оценка показателя потенциального плодородия вулканических пеплов показала более высокий потенциал пеплов вулкана Алаид относительно продуктов извержений вулкана Эбеко. При близости качественных составов пеплов вулканов Северных Курил к андезитовым пеплам Камчатских вулканов Шивелуч и Кизимен, сходство их количественных характеристик по показателю ППП обнаруживается, напротив, к пеплам базальтовых и андезибазальтовых вулканов п-ова Камчатка.

Поверхностные воды ручья, протекающего по вулкану Эбеко, сходны по составу элементов с водотоками, формирующимися в зоне воздействия пеплопадов камчатских вулканов Северной груп-

пы. Как положительный фактор формирования экологической обстановки при извержении вулкана Эбеко следует рассматривать отсутствие тенденции активного перехода в природные растворы радиоактивных элементов. Состав химических элементов, содержащихся в повышенных количествах в пеплах, не повторяет группу элементов максимально быстро переходящих в природные растворы. Наиболее активно переходят в раствор РЗЭ, определяющие схожесть всех рассмотренных поверхностных вод вблизи вулканов Северных Курил и Камчатки.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-05-00410).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреев В.И.* Положительный экологический эффект извержений вулканов и некоторых природных и техногенных аналогов (обрушений) // Материалы региональной конференции, посвященной Дню вулканолога “Вулканизм и связанные с ним процессы”, 30 марта–1 апреля 2015 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2015. С. 9–12.
- Виноградов А.П.* Введение в геохимию океана. М.: Наука, 1967. 216 с.
- Гордеев В.В.* Речной сток в океан и черты его геохимии. М.: Наука, 1983. 152 с.
- Гордеев В.В., Лисицын А.П.* Средний химический состав взвесей рек мира и питание океанов речным осадочным материалом // Докл. АН СССР. 1978. Т. 238. № 1. С. 225–228.
- Григорьев Н.А.* Среднее содержание химических элементов в горных породах, слагающих верхнюю часть континентальной коры // Геохимия. 2003. № 7. С. 785–792.
- Захарихина Л.В., Литвиненко Ю.С.* Вулканизм и геохимия почвенно-растительного покрова Камчатки. Сообщение 1. Геохимические особенности вулканических приповерхностных пеплов // Вулканология и сейсмология. 2019а. № 2. С. 34–44. <https://doi.org/10.31857/S0203-03062019234-44>
- Захарихина Л.В., Литвиненко Ю.С.* Вулканизм и геохимия почвенно-растительного покрова Камчатки. Сообщение 3. Элементный состав растительности вулканических экосистем // Вулканология и сейсмология. 2019б. № 4. С. 40–51. <https://doi.org/10.31857/S0203-03062019440-51>
- Захарихина Л.В., Литвиненко Ю.С., Гайнатулина В.В. и др.* Вулканические пеплы Камчатки как потенциальный источник улучшения биопродуктивности почв // Агрохимия. 2020. № 4. С. 66–75. <https://doi.org/10.31857/S0002188120040134>
- Карандашев В.К., Туранов А.Н., Орлова Т.А.* Использование метода масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой в элементном анализе объектов окружающей среды // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2007. Т. 73. № 1. С. 12–22.

- Лепская Е.В.* Влияние пепла вулкана Алаид на фитопланктон озера Курильского (Южная Камчатка) // Исследование биологии и динамики численности промысловых рыб камчатского шельфа. Петропавловск-Камчатский. 1993. Вып. 2. С. 21–24.
- Литвиненко Ю.С., Захарихина Л.В.* Вулканические пеплы как фактор формирования радиоэкологических условий на Камчатке. Часть I. Распространенность и гипергенная трансформация Th и U в современных вулканических пеплах // Вулканология и сейсмология. 2016. № 1. С. 56–71.
- Литвиненко Ю.С., Захарихина Л.В.* Химическая трансформация почв Камчатки после поступления в них продуктов вулканических извержений // Сибирский экологический журн. 2017. Т. 24. № 6. С. 772–788. <https://doi.org/10.15372/SEJ20170609>
- Литвиненко Ю.С., Захарихина Л.В.* Гидрогеохимическое районирование речной сети Камчатки // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 2. С. 182–195. <https://doi.org/10.31857/S0321059620020091>
- Максимов Л.П., Аникин Л.П., Вегасова А.А. и др.* Пеплы извержения Корякского вулкана (Камчатка) в 2009 г.: особенности состава и игенезис // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2011. № 2. Вып. 18. С. 73–86.
- Малик Н.А.* Извержение вулкана Безымянный 24 декабря 2006 г., Камчатка // Вулканология и сейсмология. 2011. № 4. С. 50–59.
- Малик Н.А.* Пеплы извержений вулканов Камчатки (2006–2013 гг.): состав, масса и водорастворимый комплекс / Дисс. ... канд. геол.-мин. наук. Петропавловск–Камчатский, 2019. 160 с.
- Овсяников А.А., Малик Н.А.* Тейфра извержения вулкана Кизимен в декабре 2010–феврале 2011 гг. // Материалы региональной конференции “Вулканизм и связанные с ним процессы”, посвященной Дню вулканолога, 30 марта–1 апреля 2011 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2011. С. 57–61.
- Павлюткин Б.И., Чекрыжев И.Ю.* Вулканизм, углегenez и проблемы биологического вымирания на рубеже Мезозой-Кайнозой // Успехи наук о жизни. 2010. № 2. С. 68–77.
- Рашидов В.А., Аникин Л.П.* Полевые работы на вулкане Алаид (о. Атласова, Курильские острова) в 2018 году // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2018. № 3. Вып. 39. С. 112–113. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2018-3-39-105-113>
- Рашидов В.А., Малик Н.А., Фирстов П.П. и др.* Активизация вулкана Алаид (Курильские острова) в 2012 г. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2012. № 2. Вып. 20. С. 8–15.
- Саев Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П. и др.* Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335 с.
- Соколов И.А.* Вулканизм и почвообразование. М.: Наука, 1973. 224 с.
- Шатров В.А.* Редкоземельные элементы как индикаторы условий образования осадочных пород палеозоя–мезозоя (на примере осадочного чехла Воронежской антеклизы) // Осадочные процессы, седиментогенез, литогенез, рудогенез (эволюция, типизация, диагностика, моделирование) // Материалы 4-го Всероссийского литологического совещания, Москва, 7–9 ноября 2006 г. М.: ГЕОС, 2006. Т. 1. С. 385–388.
- Ярошевский А.А.* Проблемы современной геохимии. Новосибирск: НГУ, 2004. 194 с.
- Aubert D., Stille P., Probst A. et al.* Characterization and migration of atmospheric REE in soils and surface waters // Geochim. Cosmochim. Acta. 2002. V. 66. № 19. P. 3339–3350.
- Haskin L.A., Haskin M.A., Frey F.A., Wildman T.R.* Relative and absolute terrestrial abundance's of the rare earths // Origin and Distribution of the Elements / Ed. L.H. Ahrens. Pergamon Press, 1968. P. 889–912.
- Gromet L.P., Dumek R.F., Haskin L.A., Korotev R.L.* The “North American shale composite”: Its composition, major and trace element characteristics // Geochim. Cosmochim. Acta. 1984. V. 48. Iss. 12. P. 2469–2482.
- Pahg Xin, Li Decheng, Peng An.* Application of Rare-earth Elements in the Agriculture of China and its Environmental Behavior in Soil // Environmental Sciens and Pollution Research. 2002. V. 9. Iss. 2. P. 143–148.
- Ramos Silvio J., Dinali Guilherme S, Oliveira Cynthia et al.* Rare Earth Elements in the Soil Environment // Current Pollution Reports. 2016. V. 2. P. 28–50. <https://doi.org/10.1007/s40726-016-0026-4>
- Shoji S., Nanzyo M., Dahlgren R.A.* Volcanic Ash soils. Genesis, Properties and Utilization. Amsterdam: Elsevier, 1993. 287 p.

Geochemistry and Potential Fertility of Volcanic Ashes of Alaid and Ebeko Volcano Eruptions (Kuril Islands)

L. V. Zakharihina^{1, *}, V. A. Rashidov^{2, **}, and L. P. Anikin^{2, ***}

¹Federal Research Center “Subtropical Scientific Center of the Russian Academy of Sciences”, Yana Fabriciusa str., 2/28, Sochi, Krasnodar Territory, 354002, Russia

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

*e-mail: zlv63@yandex.ru

**e-mail: rashidva@kscnet.ru

***e-mail: alp@kscnet.ru

The general features of the elemental composition of the ash from the eruptions of the Kuril volcanoes Alaid and Ebeko have been established. In the ashes, the concentrations of K, Bi, U, Cs, Th, Na, Yb are steadily exceeded relative to the average contents for the corresponding types of volcanics. The deficient elements ($K_k < 1$)

include: Mg, Ag, Sn, Nb, Ta, Ni, Cr. Of the considered spectrum of ashes of different volcanoes on the Kamchatka Peninsula (Klyuchevskoy, Tolbachik, Ksudach, Bezmyanny, Koryaksky, Shiveluch, Kizimen), the products of eruptions from Shiveluch and Kizimen volcanoes are closest in elemental composition to the ashes of the studied volcanoes of the Kuril Islands. The ashes of the Alaid and Ebeko volcanoes differ from most of Kamchatka's ashes by the increased content of radioactive elements (U, Th). A comparatively high potential of biological productivity of the ashes of the Kuril volcanoes has been established. The considered index of potential fertility (PPP) in comparison with the most productive ash of the Kamchatka Peninsula, for which the PPP is taken as a unit, is 0.72 and 0.66 units for the ash of Alaid and Ebeko volcanoes, respectively. A consistent dependence of the PPP on the content of silicon in ashes is observed: the higher the basicity of the ashes, the greater their potential fertility. For the first time, the effect of fractionation of rare earth elements was discovered, which manifests itself in all studied volcanic ashes (both the Kuril Islands and Kamchatka) in the form of a positive europium anomaly with an E/Er* value from 1.2 to 1.8 units. When assessing the elemental composition of the surface waters of the brook flowing along the Ebeko volcano, no tendency was found for an active transition of radioactive elements from ashes to natural solutions. A comparative analysis of the waters of this brook with the streams of the surroundings of the studied volcanoes of Kamchatka showed that the relationship of their compositions largely determines the time factor. Watercourses near different volcanoes at the time of an eruption show similarities, and rare earth elements (REE) are very actively transferred into their waters during ash falls, their contents in the streams exceed the average REE contents for fresh waters of continents by two orders of magnitude. After the end of a volcanic event, the relationship between the geochemical compositions of waters in the ash fall areas of different volcanoes weakens. The waters of shallow streams near volcanoes during eruptions can be considered as natural liquid fertilizers containing REE.

Keywords: volcanic ash, Alaid, Ebeko, elemental composition