

УДК 574.2.043

ВУЛКАНИЗМ И ГЕОХИМИЯ ПОЧВЕННО-РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА КАМЧАТКИ. СООБЩЕНИЕ 3. ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ЭКОСИСТЕМ

© 2019 г. Л. В. Захарихина^{1, *}, Ю. С. Литвиненко^{2, **}

¹Научно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН
683002 Петропавловск-Камчатский, Северо-Восточное шоссе, 30

²ООО ЭкоГеоЛит

119330 Москва, ул. Мосфильмовская, 17 Б

*e-mail: zlv63@yandex.ru

**e-mail: ecogeolit@mail.ru

Поступила в редакцию 05.05.2017 г.

Связь химического состава растения с активным вулканизмом Камчатки, определяется стабильным вхождением в состав приоритетных химических элементов для растений, вулканических пеплов и почв: Ca, Mg, Mn, P, Cu, Zn и Sr. Установлен повышенный геохимический фон растений Камчатки относительно валового химического состава почв полуострова. Содержания Vg, Hg, Hf, Sb, Ga, W, K относительно кларков для живого вещества в растениях региона повышены в 3–5 раз. На фоне небольших вариаций содержаний химических элементов в растениях разных районов определен относительно богатый биогеохимический фон Западного района Южной провинции (западное побережье Камчатки), где наиболее древние для Камчатки приповерхностные вулканические пеплы преобразованы в гумусово-аккумулятивные горизонты. На территории поступления молодых вулканических пеплов в ближайших окрестностях вулканов установлено относительное богатство растительности химическими элементами и бедность почв подвижными формами элементов. На удалении от вулканов в зоне выпадений пеплов дальнего переноса отмечается напротив сравнительная бедность растений и богатство почв доступными химическими элементами.

Ключевые слова: Камчатка, растения, почвы, пеплы, химический состав.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0203-03062019440-51>

ВВЕДЕНИЕ

В современной научной литературе имеется немало работ, посвященных влиянию вулканических извержений на формирование морфологии растительного покрова Камчатки [Вяткина и др., 2014; Гришин, 2009, 2010; Кораблев, Нешатаева и др., 2014]. Достаточно подробно описано влияние гидротермальных процессов на ценоотическое разнообразие растительности термальных местообитаний [Липшиц, 1936; Нешатаева, 1994; Нешатаева и др., 1997; Рассохина, Чернягина, 1982; Самкова, 2009, 2016]. При этом остаются слабо изученными вопросы общего биогеохимического фона в разных районах полуострова. Кроме того, среди разнообразных факторов, действующих на формирование биогеохимических свойств, специфическое влияние вулканизма на особенности образования элементного состава растений фактически не исследовано.

Разнообразные условия вулканической деятельности, характерные для полуострова Кам-

чатка, позволяют рассматривать связь биогеохимии растений с вулканизмом, различающимся периодичностью событий, объемами и составом продуктов извержений на обширной территории региона. Целью работы является изучение элементного состава растений разных районов Камчатки в связи с особенностями влияния на него активной вулканической деятельности.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Из классических основ биогеохимии известно, что химический состав растительного покрова в первую очередь зависит от состава и свойств почв, на которых они произрастают [Виноградов, 1952; Добровольский, 1998]. В этой связи, установление особенностей элементного состава растений Камчатки выполнено в соответствии с почвенным районированием полуострова внутри пяти районов, входящих в две (Северную и Южную) почвенные провинции. Принципы выполненного нами почвенного рай-

онирования Камчатки и характеристика почвенных и вулканогенных условий районов описаны в работе [Захарихина, Литвиненко, 2019a].

В статье обобщены данные опробований растительности, проводившиеся авторами в различных районах Камчатки с 2006 по 2013 гг. в один и тот же период – в конце августа, начале сентября. Для биогеохимической характеристики был выбран “сквозной” вид семейства злаковых – вейник Лангсдорфа. Названное растение является типичным представителем камчатского разнотравья всех высотных поясов полуострова. Многолетний тип вегетации, мощная корневая система вейника, способствуют стабильности его элементного состава. В пробу отбиралась надпочвенная часть вейника в объеме 150–200 г с промывкой в проточной воде. Биогеохимические исследования проведены методом эталонных (ключевых) участков, расположенных в лесной зоне (преимущественно каменно-березовые разнотравные леса), местоположения участков вынесены на карту-схему (см. рисунок из работы [Захарихина, Литвиненко, 2019a]).

Определение элементного состава растений выполнялись с использованием количественных методов анализа – масс-спектрометрического и атомно-эмиссионного с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS и ICP-AES). Это позволило впервые получить данные о региональных биогеохимических характеристиках всех районов почвенных провинций Камчатки по широкому спектру химических элементов. Содержания 69 химических элементов в растениях определялись по аттестованной методике НСАМ № 512/МС “Определения элементного состава пробы растительного происхождения (трава, листья) атомно-эмиссионным с индуктивно связанной плазмой и масс-спектральным с индуктивно связанной плазмой методами анализа”. Используемая аппаратура: масс-спектрометр с индуктивно-связанной плазмой Elan-6100 (“Perkin Elmer”, США); атомно-эмиссионный с индуктивно-связанной плазмой спектрометр Optima-4300 DV (“PerkinElmer”, США).

Биогеохимический фон для растений всех районов Камчатки был определен путем расчета среднегеометрических значений содержаний в них химических элементов (C_p).

Региональные геохимические фоны элементов ($C_{\text{фр}}$) для растительного покрова (средние содержания элементов для полуострова Камчатка в целом) рассчитаны как средние арифметические C_p элементов для растений всех районов полуострова. Произведен расчет кларков концентрации элементов (K_k) для растений полуострова, по формуле $K_k = C_p/K$, где K общее содержание элементов для растительности континентов (кларки живого вещества) [Виноградов,

1970]. Рассматривается весь диапазон значений $1 > K_k > 1$. При интерпретации результатов применяется традиционная в геохимии терминология для: $K_k < 1$ – приоритетные элементы, для $K_k > 1$ – дефицитные химические элементы. С целью оценки разнообразия химических составов растений разных районов (C_p) Камчатки выполнены расчеты коэффициентов концентрации элементов (K_c) по формуле $K_c = C_p/C_{\text{фр}}$.

Для определения геохимических связей растений с почвами и пеплами, в статье приведены данные о содержаниях в почвах подвижных форм химических элементов. При извлечении подвижных (доступных для растений) форм 67 элементов из почв использовалась ацетатно-аммонийная вытяжка (рН 4.8). Содержания химических элементов в почвенной вытяжке устанавливалось методами ICP-MS + ICP-AES по аттестованной методике НСАМ № 500-МС “Определение элементного состава азотнокислых и ацетатно-аммонийных вытяжек из почв методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой”. Отношение тв.:жидк. = 1:10. Установление педохимических параметров для почвенных районов (C_p^n) выполнено с использованием результатов исследований почв по аналогичным с растениями ключевым участкам. Региональные содержания ($C_{\text{фр}}^n$) рассчитаны как среднеарифметические C_p^n , расчеты коэффициентов концентрации подвижных форм элементов для почв (K_c^n) выполнены по формуле $K_c^n = C_p^n/C_{\text{фр}}^n$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Вулканизм как фактор относительной обогащенности химическими элементами растений Камчатки на фоне бедности почв региона

Сравнение элементного состава растений полуострова Камчатка ($C_{\text{фр}}$) (табл. 1) с глобальными кларками живого вещества показывает достаточно высокие содержания некоторых химических элементов, K_k которых составляют значения от 3 до 5 единиц (Вг, Нг, Нф, Sb, Ga, W, К). Из 40 изученных химических элементов, для которых есть данные о глобальных кларках, 20 являются приоритетными для региона и имеют значения K_k выше или близкие к единице (рисунок).

В сравнении с валовыми содержаниями элементов в почвах полуострова [Захарихина, Литвиненко, 2019б] растения обладают более богатым элементным составом (см. рисунок). Почвенный покров региона в сравнении с почвами континентов (глобальными кларками для почв) по большинству химических элементов

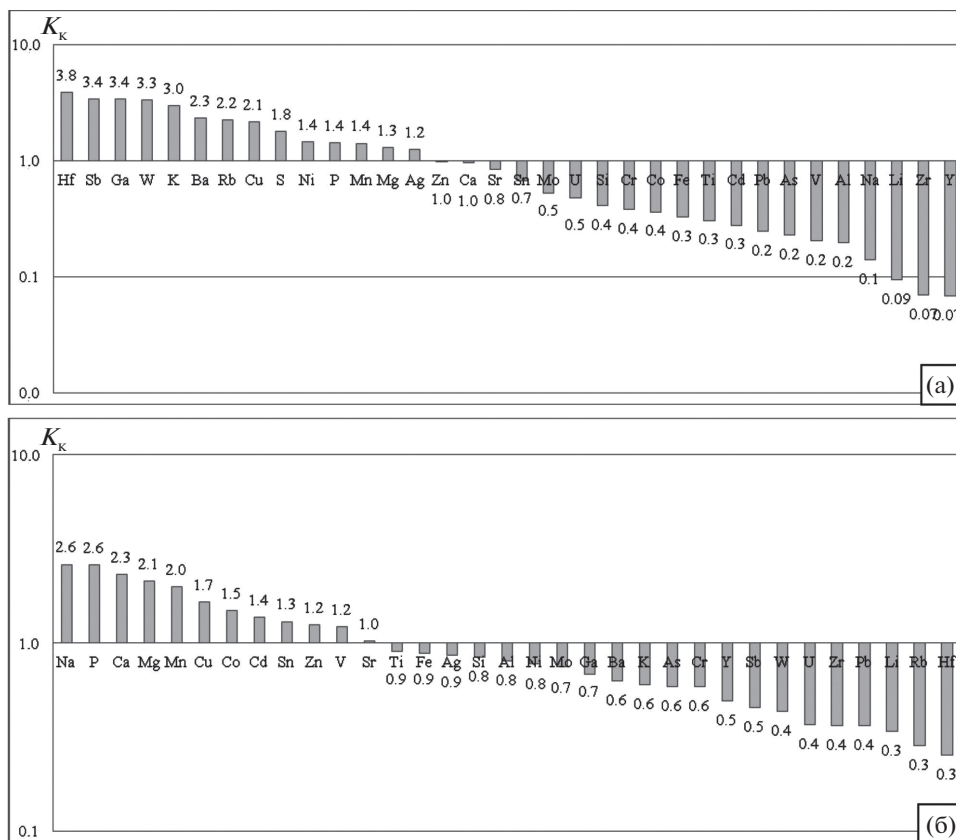


Рис. Кларки концентраций химических элементов для растений (а) и для почв (валовые содержания) Камчатки (б).

имеют значения K_k ниже единицы. Анализ химических составов растений и почв Камчатки по сходному спектру химических элементов (для которых имеются данные о глобальных кларках и для почв, и для растений) показывает, что для растительности характерно большее количество элементов с K_k выше единицы в сравнении с почвами (16 в сравнении с 12 для почв) и более высокие значения K_k . Так для пяти из 16, сравниваемых приоритетных элементов для растений значения K_k составляют от 3.0 до 3.8 единиц. Для почв пять элементов с максимально высокими кларками концентраций имеют значения K_k от 2.0 до 2.6 (см. рисунок).

Здесь необходимо отметить, что почвы Камчатки не только имеют бедный элементный состав, но и обладают общей невысокой потенциальной биопродуктивностью. Почвенный покров полуострова характеризуются малопродуктивным фульватным гумусом, низкой степенью насыщенности основаниями, кислой реакцией среды, слабой оструктуренностью органогенных горизонтов.

Химический состав растительного покрова безусловно зависит от свойств почв, на которых они произрастают. Однако химические свойства растительности зависят также от ее избиратель-

ности к поглощению разных элементов в соответствии с физиологическими потребностями и разными коэффициентами биологического поглощения для различных химических элементов. Немаловажны в формировании биогеохимических свойств и специфические региональные условия.

В нашем случае довольно бедные почвенные условия Камчатки никак не могут способствовать формированию растений, для которых содержания химических элементов превышают в ряде случаев глобальные кларки для растений от 5 до 3 раз (табл. 2).

Относительная обогащенность растений полуострова химическими элементами на фоне бедности почв региона, конечно, обусловлена влиянием активной вулканической деятельностью на все биогеохимические процессы, протекающие в природных средах.

В результате современной активной деятельности вулканов Камчатки поступление продуктов вулканических извержений на поверхность Земли происходит регулярно, через небольшие или существенные временные интервалы в течение всего голоцена. Как показывает изучение гидрохимических свойств водотоков вблизи вулканов [Захарихина, Литвиненко, 2008], все

Таблица 1. Содержания химических элементов в растениях Камчатки, мг/кг

Элементы	Кларк по Виноградову	Северная провинция		Южная провинция			Среднее по региону ($C_{фр}$)
		Западный район, $n = 30$	Восточный район, $n = 44$	Западный район, $n = 55$	Центральный район, $n = 50$	Юго-Восточный район, $n = 30$	
Li	0.6	0.023	0.108	0.114	0.021	0.017	0.06
Be	0.04	0.002	0.001	0.004	0.002	0.005	0.003
B	10	1.80	6.13	4.74	5.72	5.14	4.71
Na	200	13.17	41.58	39.66	16.34	29.12	28
Mg	700	760	1182	1260	631	670	901
Al	200	19	51	66	27	32	39
Si	1500	317	500	743	852	635	610
P	700	497	570	1268	1293	1305	987
S	500	951	776	943	744	1028	888
K	3000	9214	6141	8502	9038	11445	8868
Ca	3000	2904	3453	2991	2978	2037	2873
Sc	—	~0.15	0.21	~0.15	~0.15	~0.15	0.16
Ti	10	1.21	4.66	5.07	2.01	2.30	3.05
V	1	0.13	0.28	0.28	0.15	0.17	0.20
Cr	1	0.37	0.49	0.45	0.29	0.29	0.38
Mn	300	359	392	605	441	315	422
Fe	200	54.2	85.2	83.2	46.9	54.5	64.79
Co	0.2	0.08	0.09	0.10	0.05	0.05	0.07
Ni	0.5	1.07	0.34	0.60	0.45	1.16	0.72
Cu	2	4.35	3.65	3.92	3.78	5.66	4.27
Zn	20	15.36	19.77	22.74	21.90	17.25	19.40
Ga	0.01	0.02	0.04	0.05	0.03	0.03	0.03
Ge	1	0.04	0.03	0.07	0.06	0.03	0.05
As	0.1	0.01	0.04	0.03	0.01	0.02	0.02
Br	1.5	12.11	5.88	3.74	5.66	10.40	7.56
Rb	5	18.01	7.50	8.18	10.13	12.22	11.21
Sr	20	22.12	17.50	18.77	16.59	8.74	16.74
Y	0.3	0.01	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02
Zr	3	0.12	0.20	0.22	0.19	0.32	0.21
Nb	—	0.003	0.006	0.012	0.007	0.009	0.01
Mo	1	0.26	1.53	0.36	0.35	0.12	0.52
Ag	0.01	~0.01	~0.01	0.03	~0.01	~0.01	0.012
Cd	0.05	0.01	0.02	0.03	0.01	0.01	0.014
Sn	0.1	0.05	0.08	0.10	0.05	0.06	0.067
Sb	0.001	~0.002	0.003	0.005	~0.002	0.006	0.003
Cs	0.1	0.19	0.03	0.07	0.04	0.15	0.096
Ba	10	28.66	18.37	24.18	31.09	12.90	23.04
La	—	0.026	0.041	0.082	0.055	0.037	0.048
Ce	—	0.023	0.047	0.077	0.051	0.036	0.047
Pr	—	0.003	0.006	0.009	0.007	0.005	0.006
Nd	—	0.011	0.025	0.036	0.024	0.021	0.024
Sm	—	0.003	0.009	0.019	0.009	0.011	0.010
Eu	—	0.007	0.006	0.006	0.006	0.003	0.006
Gd	—	0.002	0.006	0.008	0.005	0.004	0.005

Таблица 1. Окончание

Tb	—	0.0004	0.001	0.001	~0.0004	~0.0004	0.001
Dy	—	0.002	0.006	0.007	0.005	0.004	0.005
Ho	—	0.001	0.002	~0.0004	~0.0004	~0.0004	0.001
Er	—	0.001	0.003	0.007	0.004	0.003	0.004
Tm	—	~0.0004	0.001	~0.0004	~0.0004	~0.0004	0.0004
Yb	—	0.001	0.003	0.006	0.0004	0.003	0.003
Lu	—	~0.0004	0.001	~0.0004	~0.0004	~0.0004	0.0005
Hf	0.001	0.004	0.008	0.005	0.0004	~0.003	0.004
Ta	—	0.002	0.004	0.003	0.003	0.004	0.003
W	0.01	0.045	0.075	0.014	0.016	0.015	0.033
Re	—	~0.0004	0.001	~0.0004	~0.0004	~0.0004	0.0004
Au	—	~0.01	0.062	0.107	0.087	0.026	0.057
Hg	0.005	0.009	0.026	0.048	0.010	0.010	0.021
Tl	—	0.008	0.005	0.011	0.004	0.004	0.006
Pb	1	0.087	0.187	0.335	0.203	0.422	0.247
Bi	—	~0.0004	0.005	0.007	0.004	0.004	0.004
Th	—	~0.0004	0.005	0.007	0.003	0.003	0.004
U	0.008	0.001	0.002	0.008	0.004	0.004	0.004

Примечание. Прочерк — нет данных, ~0.0004 — ориентировочные значения, полученные с учетом неопределенных результатов анализа, путем их замены величиной, равной половине предела обнаружения; содержания: Se, Te, Os, Ir, Pt — ниже предела обнаружения метода во всех районах: < 0.06, 0.002, 0.0007, 0.0007, 0.003, соответственно.

природные растворы в результате поступления продуктов вулканической деятельности периодически существенно насыщаются химическими элементами. Растительный покров “запоминает” богатство питающих растворов и сохраняет этот химический состав количественно и качественно от сезона к сезону.

Доказательством этого является связь химического состава растения с активным вулканизмом Камчатки, которая проявляется стабильным входением в состав приоритетных химических элементов для растений: Ca, Mg, Mn, P, Cu, Zn и Sr. Последние имеют высокие кларки концентраций также для приповерхностных вулканических пеплов (вулканические пеплы, залегающие под поверхностными органогенными горизонтами почв) и для почв региона (табл. 3).

Качественный состав химических элементов, имеющих устойчиво высокие K_k для почв, пеплов и растений, объясним их коэффициентами биологического поглощения. По градации А.И. Перельмана [1989] фосфор является энергично накапливаемым элементом, кальций, магний и цинк относятся к группе сильно накапливаемых, марганец входит в ряд среднего захвата. Для стронция данные о степени его биологического поглощения отсутствуют, однако входение его вместе с кальцием и магнием в одну группу щелочноземельных элементов позволяет предположить, что он подобно Ca и Mg является сильно накапливаемым элементом.

Все природные среды Камчатки формируются под влиянием активного вулканизма, проявляющегося современными извержениями молодых вулканов. Образование современных органогенных горизонтов почв в той или иной степени связано с молодыми вулканическими пеплами, при выветривании которых высвобождаются щелочноземельные металлы. Обогащенность почв и пеплов Камчатки Ca и Mg отмечается для всех почвенных районов полуострова. Повышены содержания названных химических элементов не только в сравнении с глобальными кларками для почв, но и с вулканическими почвами более теплых вулканических областей мира. Фосфор является общепризнанным приоритетным химическим элементом для всех вулканических почв мира, за счет обогащенности им вулканических пеплов [Martínez-Cortizas et al., 2004; Shoji et al., 1993]. Изучение трансформации природных сред, выполненные нами после недавних извержений Северной группы вулканов Камчатки, показало, что высокие содержания меди, марганца и цинка вблизи активных вулканов связано с поступлением свежих продуктов вулканической деятельности [Захарихина и др., 2016].

Можно сказать, что Ca, Mg, Mn, P, Cu, Zn и Sr это не только типоморфные и приоритетные химические элементы для почв и растений Камчатки, но и элементы, отражающие генетическую связь

Таблица 2. Кларки концентраций химических элементов для растений Камчатки относительно глобальных кларков для растительности суши

Приоритетные элементы	Br(5.04), Hg(4.18), Hf(3.85), Sb(3.37), Ga(3.36), W(3.31), K(2.96), Ba(2.30), Rb(2.24), Cu(2.14), S(1.78), Ni(1.45), P, Mn (1.41), Cs(1.36), Mg(1.29), Ag(1.25), Zn(0.97), Ca(0.96), Sr(0.84)
Дефицитные элементы	Sn(0.67), Mo(0.52), U(0.47), B(0.47), Si(0.41), Cr(0.38), Co(0.36), Fe(0.32), Ti(0.30), Cd(0.28), Pb(0.25), As(0.23), V(0.20), Al(0.20), Na(0.14), Li(0.09), Be, Zr, Y(0.07), Ge(0.05)

Примечание. Значение K_c в скобках.

Таблица 3. Кларки концентраций некоторых приоритетных химических элементов для растений, почв и приповерхностных вулканических пеплов Камчатки

Природные среды	Ca	Mg	Mn	P	Cu	Zn	Sr
Растения	0.96	1.29	1.41	1.41	2.14	0.97	0.84
Почвы	2.31	2.13	2.02	2.61	1.65	1.25	1.03
Приповерхностные пеплы	2.46	2.38	1.88	1.85	1.64	1.21	1.18

почвенно-растительного покрова полуострова с голоценовой вулканической деятельностью.

Элементный состав растений разных районов Камчатки

Сравнение химических составов растительности пяти почвенных районов Камчатки относительно друг друга, выполненное путем расчетов K_c , указывает на незначительные вариации этих параметров (табл. 4). Содержания большинства химических элементов для разных районов имеют коэффициенты концентрации близкие к единице, колеблющиеся в пределах 1.5 до 0.7, то есть отклоняющиеся от средних показателей для полуострова не более чем на 33%. С другой стороны, наиболее существенные отличия в элементных составах растений свидетельствуют о их связи с почвенными, природно-климатическими условиями и спецификой вулканической деятельности.

Обращает на себя внимание относительно богатый биогеохимический фон Западного района Южной провинции (западное побережье Камчатки). Из 49 изученных химических элементов, 40 имеют для растений $K_c \geq 1$ (см. табл. 4). В состав приоритетных входят, в основном, элементы, типоморфные для кислых пород. Это объяснимо риолито-дацитовым составом вулканических приповерхностных пеплов района, на которых образованы поверхностные органогенные горизонты почв.

Другой специфической особенностью геохимии почвенно-растительного покрова западного побережья Камчатки является самая тесная связь элементного состава растений с содержаниями подвижных (доступных для растений) форм химических элементов в почвах (табл. 5). Из 34 приоритетных элементов для растений, 27 (79.4%) и для почв имеют коэффициенты концентраций выше единицы (U, Cd, Li, Tl, Al, Ga, Mn, Be, Na, Co, Mg, V, P, Cr, Zn, Sr, Ba, Ca, Zr, B), или значения K_c близкие к единице (Er, Ti, Gd, As, Pb, Y, Fe).

Отмеченная геохимическая специфика обсуждаемого района определена особенностью влияния вулканической деятельности на эту территорию в голоцене, которая обусловила формирование здесь максимально “зрелых” наиболее преобразованных процессами почвообразования и гипергенеза вулканических почв. Территория максимально удалена от центров активной вулканической деятельности, продукты вулканических извержений поступали сюда более чем 2920 лет назад (самый древний для Камчатки возраст приповерхностных пеплов). За время, прошедшее после последнего перекрытия почв вулканическими пеплами, последние преобразовались в хорошо выраженные гумусово-аккумулятивные горизонты с достаточно высоким содержанием гумус, который способствует накоплению химических элементов. Кроме благоприятных почвенных условий относительно богатый

Таблица 4. Коэффициенты концентраций химических элементов для растений разных районов Камчатки относительно $C_{фр}$

Провинция	Район	Геохимическая формула
Северная	Западный	Cs(2.9)-Rb, Br, (1.6)-Ni(1.5)-W(1.4)-Eu, Sr(1.3)-Ba, Tl(1.2)-S(1.1)-Co, K, Cu, Ca, Cr(1.0) Mn(0.9)-Mg, Fe, Sn, Zn, Ge(0.8)-Ga, V, Y(0.7)-Be, Ta(0.6)-Zr, La, Si, P, Mo, Ce, Al, Gd, Cd, Nd, Na, Pr(0.5)-Dy, Hg, As, Li, Ti, B, Nb, Pb(0.4)-Er, Sm(0.3)-U(0.2)
	Восточный	Mo(2.9)-W(2.3)-Li(1.9)-As(1.6)-Ti, Na(1.5)-V(1.4)-Fe, Mg, Al, B, Cr, Ta, (1.3)-Hg, Co, Ca, Dy, Gd(1.2)- Sn, Cd, Ga, Y, Nd(1.1)-Eu, Ce, Pr, Zr(1.0) Mn, Er, S, La, Cu(0.9)-Sm, Si, Ba, Nb, Br, Tl, Pb(0.8)-Ge, K, Rb(0.7)-P(0.6)-U, Ni(0.5)-Be(0.4)-Cs(0.2)
Южная	Западный	Hg(2.3)-U(2.1)-Cd, Li, Er(2.0)-Sm(1.9)-Tl, La, Al, Ti, Nb(1.7)-Ce, Ga, Nd(1.6)-Pr, Gd, Ge(1.5)- Sn, Mn, Dy, Be, Na, Co, Mg, As, Pb, V(1.4)-Y, P, Fe, (1.3)-Si, Cr, Zn, (1.2)-Sr, S(1.1)-Ba, Eu, Ca, Zr, B, K(1.0) Ta, Cu(0.9)-Ni(0.8)-Rb, Mo(0.7)-Cs, Br(0.5)-W(0.4)
	Центральный	Si, Ge(1.4)-Ba, P, Pr, (1.3)-B(1.2)-La, Zn, U, Dy, Ce, Er(1.1)-Mn, Eu, Ca, Nd, K, Sr, Nb(1.0) Ta, Zr, Gd, Rb, Sm, Cu, Be(0.9)-S, Pb, Y, Cd, Ga, Cr(0.8)-Br, V, Fe, Sn, Mg, Al, Mo, Ti(0.7)-Ni, Tl, Na(0.6)- As, Hg, W(0.5)-Li(0.4)-Cs(0.2)
	Юго-Восточный	Pb(1.7)-Be, Ni(1.6)-Zr(1.5)-Br(1.4)-Cu, P, Ta, K(1.3)-Nb, S(1.2)-Y, Cs, Sm, U, B, Rb(1.1)-Si, Na, As(1.0) Sn, Zn, Gd, Nd, V, (0.9)-Fe, Dy, Al, Ga, Ce, Cr, Pr, La, Ti(0.8)-Mn, Vg, Er, Ca, Ge, Co(0.7)- Tl, Eu, Cd, Ba(0.6)-Sr, Hg, W(0.5)-Li(0.3)-Mo(0.2)

Примечание. Значение K_c в скобках.

элементный состав растительности данного района, возможно, объясним также близостью побережья Охотского моря, и розой ветров региона, которая по общим годовым параметрам имеет преимущественно северо-восточное направление [Кондратьев, 1974].

Фактор влияния морей и Тихого океана на состав растений подтверждается биогеохимическими характеристиками Юго-Восточного района Южной провинции и Восточного района Северной провинции. Районы, с востока граничащие с морским побережьем, имеют в сравнении с Центральным районом Южной провинции относительно более богатый биогеохимический фон. Кроме того, для них отмечается вхождение в состав приоритетных элементов, как для растений, так и для почв Na.

Северная почвенная провинция Камчатки включает два района, для которых основным

“средообразующим” фактором геохимии природных сред является деятельность вулкана Шивелуч, поставляющего сюда продукты своей активной деятельности в течение всего голоцена. Восточный район, как территория ближайших окрестностей Северной группы вулканов полуострова, испытывает также влияние пеплопадов ближнего переноса не только названного вулкана, но и вулканов Ключевской, Толбачик и Безымянный.

Западный район Северной провинции является территорией, куда регулярно поступают продукты извержений вулкана Шивелуч дальнего переноса. Так в режимной точке наблюдений в верховьях р. Левая Озерная (наблюдаемой нами последние 10 лет) в 115 км севернее вулкана только в зимний период не реже 3–5 раз в год отмечается поступление тонких пеплов вулкана Шивелуч на снег.

Таблица 5. Параметры регионального геохимического фона подвижных форм элементов в почвах ($C_{\text{фр}}^n$) по данным ИСР анализа (мг/кг) и коэффициенты концентраций растений (K_c) (над чертой) в сравнении с коэффициентами концентрация для почв (K_c^n) (под чертой) для районов почвенных провинция Камчатки

Элементы	$C_{\text{фр}}^n$	K_c / K_c^n				
		Северная провинция		Южная провинция		
		Западный район	Восточный район	Западный район	Центральный район	Юго-Восточный район
Li	0.01	0.4/1.0	1.8/1.0	1.9/1.0	0.4/1.0	0.3/1.0
Be	0.0058	0.7/1.7	0.3/0.5	1.3/1.7	0.7/0.5	1.7/0.5
B	0.3	0.4/0.7	1.3/1.3	1.0/1.1	1.2/0.9	1.1/0.9
Na	17.3	0.5/0.03	1.5/0.1	1.4/2.4	0.6/0.1	1.0/2.4
Mg	292.8	0.8/0.2	1.3/1.6	1.4/1.3	0.7/1.1	0.7/0.8
Al	219.5	0.5/2.2	1.3/0.3	1.7/1.0	0.7/0.6	0.8/0.9
Si	22.7	0.6/2.3	0.8/1.0	1.2/0.7	1.4/0.6	1.0/0.5
P	42.1	0.5/0.6	0.6/0.8	1.3/1.0	1.3/1.4	1.3/1.0
S	47.5	1.1/1.5	0.9/0.4	1.1/1.1	0.8/0.8	1.2/1.3
K	252.4	1.0/0.5	0.7/0.9	1.0/1.5	1.0/1.2	1.3/0.9
Ca	1350.9	1.0/0.2	1.2/1.2	1.0/1.2	1.0/1.4	0.7/1.0
Ti	0.74	0.4/2.1	1.5/0.5	1.7/0.9	0.7/0.8	0.8/0.6
V	0.15	0.7/1.4	1.4/1.0	1.4/1.0	0.8/0.8	0.9/0.7
Cr	0.11	1.0/1.9	1.3/0.5	1.2/1.5	0.8/0.5	0.8/0.7
Mn	95.85	0.9/0.1	0.9/0.7	1.4/1.4	0.8/2.0	0.7/0.9
Fe	55.7	0.8/2.0	1.3/0.7	1.3/0.9	0.7/0.7	0.8/0.7
Co	0.27	1.1/0.7	1.3/1.3	1.4/1.1	0.7/0.9	0.7/1.0
Ni	0.30	1.5/1.0	0.5/1.1	0.8/1.1	0.6/1.0	1.6/1.0
Cu	0.3	1.0/1.0	0.9/1.0	0.9/0.9	0.9/0.8	1.3/1.2
Zn	13.80	0.8/0.1	1.0/0.8	1.2/2.0	1.1/1.6	0.9/0.6
Ga	0.025	0.7/0.8	1.3/0.4	1.7/1.6	1.0/1.3	1.0/0.9
As	0.04	0.5/0.6	2.0/0.8	1.5/1.1	0.5/0.8	1.0/1.7
Rb	0.42	1.6/0.6	0.7/1.0	0.7/1.1	0.9/1.4	1.1/0.9
Sr	9.57	1.3/0.3	1.0/1.1	1.1/1.5	1.0/1.4	0.5/0.8
Y	0.07	0.5/1.8	1.0/0.8	1.5/0.7	1.0/0.7	1.0/1.0
Zr	0.11	0.6/2.0	1.0/0.5	1.0/1.3	0.9/0.7	1.5/0.6
Mo	<0.003	0.5/-	2.9/-	0.7/-	0.7/-	0.2/-
Cd	0.08	0.7/1.5	1.4/0.5	2.1/1.6	0.7/0.8	0.7/0.6
Sn	0.01	0.7/0.2	1.2/0.8	1.5/0.8	0.7/2.4	0.9/0.8
Cs	0.01	1.9/1.4	0.3/0.7	0.7/0.7	0.4/0.7	1.5/1.4
Ba	21.06	1.2/0.6	0.8/0.5	1.0/1.4	1.3/2.0	0.6/0.6
La	0.04	0.5/2.1	0.9/0.7	1.7/0.7	1.1/0.5	0.8/1.0
Ce	0.08	0.5/2.0	1.0/0.8	1.6/0.6	1.1/0.6	0.8/0.9
Pr	0.02	0.5/3.3	1.0/0.4	1.5/0.4	1.2/0.4	0.8/0.4
Nd	0.06	0.5/2.0	1.0/0.9	1.5/0.7	1.0/0.5	0.9/0.9
Sm	0.02	0.3/3.3	0.9/0.4	1.9/0.4	0.9/0.4	1.1/0.4
Eu	0.006	1.2/3.3	1.0/0.5	1.0/0.3	1.0/0.3	0.5/0.5

Таблица 5. Окончание

Gd	0.016	0.4/1.9	1.2/0.6	1.6/0.6	1.0/0.6	0.8/1.3
Tb	0.00356	0.4/2.8	1.0/0.6	1.0/0.6	0.4/0.4	0.4/0.7
Dy	0.0226	0.4/3.1	1.2/0.5	1.4/0.4	1.0/0.4	0.8/0.6
Ho	0.0025	1.0/1.6	2.0/0.9	0.4/0.8	0.4//0.7	0.4/1.0
Er	0.007	0.2/1.4	0.8/0.8	1.8/1.4	1.0/0.7	0.8/0.8
Tm	0.001	1.0/1.0	2.5/1.0	1.0/1.0	1.0/1.0	1.0/1.0
Yb	0.005	0.3/2.0	1.0/0.8	2.0/0.8	0.1/0.6	1.0/0.8
Lu	0.002	0.8/2.2	2.0/0.6	0.8/1.1	0.8/0.6	0.8/0.6
Hf	0.009	1.0/3.5	2.0/0.4	1.3/0.6	0.1/0.2	0.8/0.4
W	<0.006	1.4/-	2.3/-	0.4/-	0.5/-	0.5/-
Tl	0.012	1.3/0.8	0.8/0.8	1.8/1.7	0.7/0.8	0.7/0.8
Pb	0.266	0.3/0.5	0.8/0.5	1.4/0.8	0.8/0.7	1.7/2.5
Bi	0.003	0.1/0.6	1.3/0.9	1.8/0.9	1.0/0.9	1.0/1.6
Th	0.010	0.1/2.1	1.3/0.4	1.8/1.0	0.8/0.5	0.8/0.9
U	0.013	0.2/1.6	0.5/0.7	2.0/1.6	1.0/0.7	1.0/0.5

Анализ связи биогеохимических особенностей районов Северной провинции с их педохимическими характеристиками (содержаниями подвижных форм элементов в почвах) показывает неожиданную закономерность (см. табл. 5). Наблюдается относительно повышенная обеспеченность растений Восточного района при сравнительно низких содержаниях подвижных форм элементов в почвах территории и небольшие содержания химических элементов в растениях Западного района при хорошей обеспеченности элементами почв этой площади.

Природные среды Восточного района Северной провинции при извержениях испытывают влияние агрессивных кислот вулканических аэрозолей, выщелачивающих из почв легкоподвижные соединения. Этим объяснимы не высокие содержания в них подвижных форм химических элементов. Однако регулярный принос продуктов вулканических извержений, обогащенных химическими элементами, обеспечивает здесь относительное богатство природных растворов и как следствие повышенный биогеохимический фон.

Для Западного района свойственны напротив относительно небольшие содержания химических элементов в растениях в сравнении с Восточным районом. Для них отмечается незначительное количество элементов с K_c выше единицы (15 из 49 изученных) и максимальный спектр дефицитных элементов, имеющих $K_c < 1$. При этом почвенный покров территории в сравнении с другими районами Камчатки напротив максимально обеспечен подвижными формами элементов и отличается наибольшим

спектром подвижных форм элементов с $K_c > 1$. Отмечается слабая геохимическая связь растительности с почвами. Из 14 приоритетных химических элементов с $K_c > 1$ для растений, только по трем (S, Cs, Eu) установлено совпадение по вхождению в ряд приоритетных элементов для почв. Несовпадение качественного состава приоритетных элементов для почв и растений можно объяснить только барьерным механизмом последних.

Основополагающим аспектом прикладной биогеохимии (поиски рудных месторождений) является известный факт о наличии у видов, органов растений прямого и барьерного типов накопления химических элементов [Барсукова, 1997; Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989; Ковалевский, 1983; Перельман, 1989].

Первый тип отвечает линейному возрастанию содержания химического элемента в растениях, пропорциональному увеличению его содержания в почве. Второй тип характеризуется линейной зависимостью только при малых содержаниях элементов в питающих средах, при высоких концентрациях накопление элемента в растениях ограничивается неким пределом (барьером), после которого наблюдается отрицательная корреляция между содержанием элементов в почве и вегетативных органах растений. Эта зависимость объясняется наличием у растений защитных физиологических барьеров, препятствующих избыточному поступлению химических элементов в организм.

По-видимому, благоприятные педохимические условия Западного района Северной провинции малозначимы в формировании здесь

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

биогеохимических параметров за счет специфической обстановки, складывающейся благодаря современной деятельности вулкана Шивелуч, регулярно поставляющего сюда продукты извержений дальнего переноса. Содержания подвижных форм всех химических элементов в пеплах вулкана Шивелуч увеличивается с удалением от центра извержения (табл. 6). Частое поступление на территорию пирокластического вещества, обогащенного весьма подвижными формами химических элементов, насыщающих в первую очередь природные воды (питающие растворы), формируют у растений Западного района Северной провинции барьерный механизм, препятствующий накоплению в них элементов и определяющий низкий биогеохимический фон района.

Сравнительно повышенный геохимический фон растений Камчатки относительно бедного валового химического состава почв полуострова обусловлен влиянием активной вулканической деятельности. Периодическое поступление продуктов вулканических извержений на поверхность Земли насыщает все природные растворы химическими элементами, растительность “запоминает” богатство питающих растворов и сохраняет этот химический состав количественно и качественно.

Ряд химических элементов: Ca, Mg, Mn, P, Cu, Zn и Sr, являющихся приоритетными для приповерхностных вулканических пеплов, почв и растений Камчатки, определяют генетическую связь почвенно-растительного покрова

Таблица 6. Содержания подвижных форм элементов в вулканических пеплах извержения вулкана Шивелуч 27 июня 2013 г., мг/кг

Элементы	В 25 км от вулкана	В 50 км от вулкана	В 50 м/в 25 м	Элементы	В 25 км от вулкана	В 50 км от вулкана	В 50 м/в 25 м
Li	0.25	0.32	1.28	Zr	0.083	0.15	1.81
Be	0.005	0.0066	1.32	Mo	0.035	0.043	1.23
B	0.2	2.2	11.0	Cd	0.025	0.032	1.28
Na	320	540	1.69	Sb	0.0071	0.013	1.83
Mg	310	430	1.39	Cs	0.0085	0.012	1.41
Al	85	120	1.41	Ba	2.8	3.4	1.21
Si	7.2	13	1.81	La	0.21	0.24	1.14
P	40	55	1.38	Ce	0.56	0.62	1.11
S	1400	1700	1.21	Pr	0.084	0.096	1.14
K	55	99	1.80	Nd	0.39	0.45	1.15
Ca	1200	1700	1.42	Sm	0.089	0.1	1.12
Ti	0.18	0.22	1.22	Eu	0.018	0.021	1.17
V	1.7	1.9	1.12	Gd	0.079	0.095	1.20
Cr	0.45	0.61	1.36	Tb	0.01	0.012	1.20
Mn	12	16	1.33	Dy	0.052	0.064	1.23
Fe	39	71	1.82	Ho	0.0093	0.012	1.29
Co	0.18	0.2	1.11	Er	0.026	0.031	1.19
Ni	0.23	0.28	1.22	Tm	0.0032	0.0041	1.28
Cu	1.9	2	1.05	Yb	0.021	0.023	1.10
Zn	3	3.9	1.30	Lu	0.0028	0.0039	1.39
As	2.2	2.7	1.23	Tl	0.0081	0.012	1.48
Rb	0.24	0.36	1.50	Pb	0.14	0.22	1.57
Sr	8	9.7	1.21	Bi	0.046	0.055	1.20
Y	0.37	0.4	1.08	Th	0.016	0.027	1.69
				U	0.019	0.025	1.32

полуострова с голоценовой вулканической деятельностью.

Относительная обогатенность элементного состава растений Западного района Южной провинции растений определена особенностью влияния вулканической деятельности на эту территорию в голоцене. За продолжительный промежуток времени (более 2920 лет), прошедший после последнего перекрытия почв вулканическими пеплами, последние преобразовались в хорошо выраженные высокопродуктивные гумусово-аккумулятивные горизонты.

Повышенные содержания химических элементов растений Восточного района Северной провинции (ближайшие окрестности активных вулканов) при сравнительной бедности почв доступными химическими элементами объяснимы привнесением продуктов вулканических извержений, обогащающих природные воды (питающие растворы) химическими элементами.

Пониженный биогеохимический фон Западного района Северной провинции на фоне богатства почв территории обусловлен барьерным механизмом растительности. Последний препятствует накоплению в растениях химических элементов, поступающих в избыточных количествах на территорию с продуктами извержений вулкана Шивелуч дальнего переноса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Барсукова В.С.* Физиолого-генетические аспекты устойчивости растений к тяжелым металлам. Новосибирск: СО РАН, ГПНТБ, Институт почвоведения и агрохимии, 1997. 63 с.
- Виноградов А.П.* Основные закономерности в распределении микроэлементов между растениями и средой // Микроэлементы в жизни растений и животных / Под ред. А.П. Виноградова. М.: Изд-во АН СССР, 1952. С. 7–20.
- Виноградов А.П.* Направления исследований в науках о Земле. М.: Изд-во АН СССР, 1970. 367 с.
- Вяткина М.П., Гимельбрант Д.Е., Головнева Л.Б. и др.* Растительный покров вулканических плато центральной Камчатки. Ключевская группа вулканов. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2014. 461 с.
- Гришин С.Ю., Яковлева А.Н., Шляхов С.А.* Воздействие извержения вулкана Алаид (Курильские острова) в 1972 г. на экосистемы // Вулканология и сейсмология. 2009. № 4. С. 30–43.
- Гришин С.Ю.* Смена растительного покрова под воздействием вулканического пеплопада (Толбачинский дол, Камчатка) // Экология. 2010. № 5. С. 389–392.
- Добровольский В.В.* Основы биогеохимии / Под ред. В.В. Добровольского. М.: Высшая школа, 1998. 413 с.
- Захарихина Л.В., Литвиненко Ю.С.* Роль вулканических пеплов в формировании почвенно-растительного покрова в зоне современного эксплозивного вулканизма // Вулканология и сейсмология. № 1. 2008. С. 19–34.
- Захарихина Л.В., Литвиненко Ю.С., Ряховская Н.И. и др.* Особенности геохимической трансформации естественных почв и повышение продуктивности агроценозов при поступлении продуктов вулканических извержений // Вулканология и сейсмология. 2016. № 3. С. 57–72.
- 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.
- Захарихина Л.В., Литвиненко Ю.С.* Вулканизм и геохимия почвенно-растительного покрова Камчатки. Сообщение 2. Специфика формирования элементного состава вулканических почв в холодных гумидных условиях // Вулканология и сейсмология. 2019б. № 3. С. 25–33.
- Кабата-Пендиас А., Пендиас Х.* Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 440 с.
- Ковалевский А.Л.* Биогеохимия растений и поиски рудных месторождений // Дисс. ... доктора геол.-мин. наук. М., 1983. 360 с.
- Кондратюк В.И.* Климат Камчатки. М.: Гидрометеоиздат, 1974. 202 с.
- Кораблев А.П., Нешатаева В.Ю.* Динамика лесной растительности на лавовых потоках плато Толбачинский дол (Ключевская группа вулканов, Камчатка) // Ботанический журнал. 2011. Т. 96. № 11. С. 1440–1457.
- Липшиц С.Ю.* К познанию флоры и растительности горячих источников Камчатки // Бюлл. МОИП. Отд. биол. 1936. Т. 45. № 2. С. 143–158.
- Нешатаева В.Ю.* Растительные группировки окрестностей горячих ключей // Растительность Кроноцкого государственного заповедника (Восточная Камчатка) // Труды Ботанического института РАН. 1994. Вып. 16. С. 195–201.
- Нешатаева В.Ю., Чернядьева И.В., Нешатаев В.Ю.* Растительный покров территории Нижне-Кошелевских термальных источников (Южная Камчатка) // Ботанический журнал. 1997. Т. 82. № 11. С. 65–79.
- Нешатаева В.Ю., Пестеров А.О., Гимельбрант Д.Е., Федосов В.Э.* Особенности формирования растительного покрова на лавовых потоках вулкана Крашенинникова (Восточная Камчатка) // Ботанический журнал. 2014. Т. 99. № 3. С. 282–302.
- Перельман А.И.* Геохимия. М.: Высшая школа, 1989. 444 с.
- Рассохина Л.И., Чернягина О.А.* Фитоценозы термалей Долины Гейзеров // Структура и динамика растительности и почв в заповедниках РСФСР. М.: ЦНИЛ Главохоты РСФСР, 1982. С. 51–62.
- Самкова Т.Ю.* Влияние гидротермального процесса на растительность (на примере Паужетской гидротермальной

ной системы Камчатки) / Автореф. дисс. ... кандидата биол. наук. Петропавловск-Камчатский, 2009. 24 с.

Самкова Т.Ю., Рылова С.А., Кляницкий Е.С. Пространственная неоднородность термального поля и ее отражение в структуре растительного покрова юго-восточного участка Больше-Банного месторождения (Южная Камчатка) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2016. Вып. 31. № 3. С. 18–27.

Martínez-Cortizas A., Nóvoa J.C., Pontevedra X., García-Rodeja E. Elemental composition of Reference European // Volcanic Soil Resources in Europe. Reykjavic, Iceland: Agricultural Research Institute, 2004. P. 38–40.

Shoji S., Nanzyo M., Dahlgren R.A. Volcanic Ash soils. Genesis, Properties and Utilization. Amsterdam: Elsevier, 1993. 287 p.

VOLCANISM AND GEOCHEMISTRY OF SOIL AND VEGETATION COVER OF KAMCHATKA. COMMUNICATION 3. ELEMENTAL COMPOSITION OF VEGETATION OF VOLCANIC ECOSYSTEMS

L. V. Zakharikhina^{1, *}, Yu. S. Litvinenko^{2, **}

¹*Geotechnological Scientific Research Center, Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, Severo-Vostochnoe shosse 30, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683002 Russia*

²*EcoGeoLit Ltd., Mosfil'movskaya ul. 17B, Moscow, 119330 Russia*

**e-mail: zlv63@yandex.ru*

***e-mail: ecogeolit@mail.ru*

Received May 05, 2017

The link of the chemical composition of the plant with the active volcanism of Kamchatka, is determined by the stable occurrence into the composition of the priority chemical elements for plants, volcanic ashes and soils: Ca, Mg, Mn, P, Cu, Zn and Sr. An elevated geochemical background of Kamchatka plants relative to the bulk chemical composition of the peninsula's soils was established. The contents of Br, Hg, Hf, Sb, Ga, W, K relative to the clarks for living matter in the plants of the region are exceeded by 3–5 times. Against the background of small variations in the contents of chemical elements in plants of different regions, the relatively rich biogeochemical background of the Western region of the southern province (the western coast of Kamchatka) is determined, where most ancient near-surface volcanic ashes for Kamchatka are transformed into humus-accumulative horizons. On the territory of young volcanic ash fallout in the immediate vicinity of volcanoes, the relative richness of vegetation with chemical elements and the poverty of soils by mobile forms of elements have been established. On the contrary, at a distance from the volcanoes in the zone of far transfer fallout ashes, there is a marked relative poverty of plants and soil richness of available chemical elements.

Key words: Kamchatka, plants, soil, ashes, chemical composition.