

ОСОБЕННОСТИ ГЕОХИМИИ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ РЕЧНОЙ СЕТИ ПОЛУОСТРОВА КАМЧАТКА

© 2018 Л.В. Захарихина¹, Ю.С. Литвиненко²

¹Научно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН, 683002, Петропавловск-Камчатский;
e-mail: zlv63@yandex.ru

²ООО ЭкоГеоЛит, 119330, Москва

Определены состав и закономерности пространственного распространения микроэлементов в донных отложениях речной сети разных районов Камчатки. Впервые установлено, что наиболее бедный химический состав отложений, который тесно коррелирует с составом почв и молодых вулканических пеплов, характерен для районов активной вулканической деятельности. Свидетельством связи донных отложений района с молодым вулканизмом является вхождение в число приоритетных элементов Са и Mg и 11 редкоземельных элементов: Yb, Lu, Tm, Er, Dy, Ho, Gd, Y, Sm, Eu, Pr. В Центральной Камчатке, где распространены золотосеребряные рудные объекты, установлен относительно более богатый состав донных отложений, ведущие места в приоритетном геохимическом ряду здесь занимают элементы-спутники оруденения: Sb, As, Bi, Pb. На Западном побережье полуострова, где развита Камчатская никеленосная провинция в состав приоритетных элементов для донных отложений входит Ni (превышение над средним содержанием по Камчатке в 1.8 раз), а также РЗЭ: La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, сопутствующие медно-никелевому оруденению Камчатки.

Ключевые слова: донные отложения, Камчатка, вулканизм.

ВВЕДЕНИЕ

Донные отложения водотоков, благодаря своим депонирующим свойствам, являются показательным индикатором качества транспортирующих их вод, кроме того они отражают состав других компонентов природной среды (почв, продуктов разрушения горных пород) обширных водосборных площадей. На территории полуострова Камчатка в условиях активного вулканизма в состав донных осадков дополнительно входят также вулканические пеплы, залегающие в почвенно-пирокластическом чехле региона. Знание закономерностей формирования донных отложений немаловажно, как при проведении поисков рудных месторождений, так и при выполнении прикладных эколого-геохимических исследований, направленных на установление интенсивности и масштаба техногенного загрязнения.

Информация о гидрологии многочисленных больших и малых рек Камчатки, влияющих на формирование донных осадков,

приведена на основании научно-производственного отчета Камчатского регионального центра мониторинга состояния недр¹. По территории Камчатского полуострова протекает около 55500 больших и малых рек¹. Срединный, Восточный и Южный горно-вулканические хребты делят их на два бассейна: западный — бассейн Охотского моря и восточный — бассейн Тихого океана и частично Берингова моря. Общий химический состав речных вод региона довольно однообразен. В соответствии с классификацией ионного состава вод по О.А. Алекину (1970) речные воды Камчатки относятся к первому типу ультрапресных и пресных мягких вод, к классу преимущественно гидрокарбонатных со смешанным кальциево-магниево-магнийсодержащим составом катионов.

¹ Жилин Н.И. «Оценка состояния подземных вод территории п-ова Камчатка и создание гидрогеологической карты масштаба 1:500000». Книга 1. Камчатский региональный центр мониторинга состояния недр (КРЦМСН) ПГО «Камчатгеология», г. Елизово, 2009. С. 34–38.

Обширные сведения о геохимическом составе донных отложений региона были получены производственно-геологическим объединением «Камчатгеология» при проведении литохимических съемок при поисково-съемочных работах масштаба 1:200000 и крупнее, начиная с семидесятых годов прошлого столетия по настоящее время.

В 2004 г. по программе «Геохимическая карта России» Камчатским территориальным геологическим управлением совместно с Институтом минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов (ИМГРЭ) была выполнена обобщающая работа по оценке геохимических аномалий разных природных сред, в том числе тонкой фракции (-1 мм) донных осадков водотоков². В работе использован ранее полученный, в основном ретроспективный, аналитический материал, за период 1975–2003 гг. и результаты проведенных дополнительных исследований. Основной целью изучения донных отложений являлось выявление на территории полуострова аномальных геохимических полей (АГП) и анализ их качественного состава. В результате анализа геохимического состава донных осадков выделено 37 АГП, соответствующих рангу рудных районов и узлов. АГП характеризуются разными ассоциациями элементов в донных отложениях, наиболее часто встречаемые из них: Au-Hg-As-Sb-(Ag) ассоциация, указывающая на развитие на площади золото-сурьмяно-ртутной и золото-серебряной рудных формаций; Ni-Co, по которой прогнозируется кобальт-никелевое оруденение, и Cu-Mo-Zn, отвечающая медно-порфировой формации.

При выполнении цитируемой работы в качестве фона химических элементов использовались усредненные единые параметры для всего региона. Не учтены: география залегания разных по петрохимическому составу вулканических пеплов по территории Камчатки и сильно различающиеся мощности почвенно-пирокластического чехла, влияющие на состав донных осадков. Кроме того, вся информация, полученная при оценке АГП, основывалась на исследованиях с применением полуколичественного спектрального метода. Чувствительность его нельзя признать достаточной для получения фоновых показателей для большинства химических элементов. Отсутствуют также данные о содержаниях большого спектра элементов, не определяемых спектральным анализом.

² *Криночкин Л.А., Николаев Ю.Н., Талалай М.А.* Отчет по объекту «Многоцелевые прогнозно-геохимические работы масштаба 1:1 000000 на листах L-52,-53; M-49; M-53; N-48; N-49; N-50; O-40; Q-35,-36; K-37,-38,-39; N-56,-57,-58, M-57 и создание геохимических основ Госгеолкарты-1000/3 на листах N-39; M-46,-47; O-47; N-47; P-58» (в 20 томах), 2004 г.

Основной целью работы является установление особенностей формирования геохимических свойств донных отложений Камчатки на уровне фона (вне явных геохимических аномалий). Работа является частью проводимых авторами комплексных геохимических исследований природных сред Камчатки — современных вулканических пеплов, почв, растений, природных вод, где донные отложения являются конечным звеном миграционной цепи элементов в ландшафтных сопряжениях вулканических экосистем полуострова.

Для решения поставленной задачи установлены геохимические свойства донных отложений речной сети различных районов Камчатки на уровне фона, выявлена степень зависимости элементного состава донных осадков от гидрогеохимии вод, геохимического состава современных пеплов и почв, развитых на водосборных площадях.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Геохимия всех природных сред Камчатки, в том числе компонентов, определяющих состав донных осадков (речных вод, вулканических пеплов и почв на них образованных), в значительной степени зависит от условий вулканизма территорий их развития. Учитывая это, изучение геохимических особенностей донных осадков региона, выполнено в рамках предложенного нами районирования. В пределах полуострова Камчатка изучены территории, имеющие сходное строение почвенных профилей с идентичными по составу и возрасту пепловыми горизонтами, отложившимися в результате известных крупных извержений вулканов Камчатки в голоцене (Литвиненко, Захарихина, 2008). Выделены: Северная почвенная провинция, разделенная на Восточный и Западный районы, и Южная почвенная провинция, в состав которой входят Центральный, Западный и Юго-Восточный районы (рисунок).

Изучения и опробования донных осадков, так же, как и речных вод, проведены по точкам наблюдения (рисунок). Исследовались отложения водотоков, относящихся к речной сети крупных рек. Для Западного района Северной провинции это реки: Лев. Озерная, Порожистая и Еловка. В Восточном районе этой провинции (окрестности вулканов Шивелуч, Толбачик, Безымянный, Ключевская сопка) исследованы притоки р. Камчатка и р. Быстрая, попадающие в ареалы выпадения пеплов названных вулканов Ключевской группы (руч. Студеный, Бельчинок, Кабеку) и, находящиеся за пределами активных пеплопадов (руч. Эульчинок, р. Кававля и р. Анавгай). Западный район Южной провинции

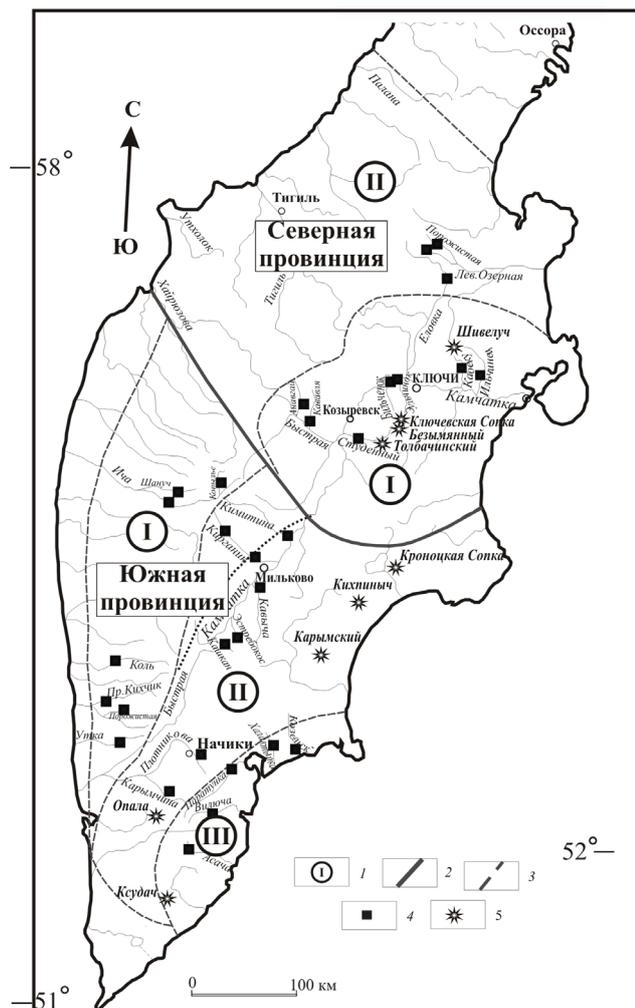


Рисунок. Карта-схема объектов исследований: 1 — районы почвенных провинций: I — Западный, II — Центральный, III — Юго-Восточный (Южная провинция), I — Восточный, II — Западный (Северная провинция); 2 — граница между провинциями; 3 — границы между районами; 4 — точки наблюдений, 5 — вулканы.

Picture. Map diagram of research objects: 1 — areas of soil provinces: I — Western, II — Central, III — Southeast (Southern Province), I — Eastern, II — Western (Northern Province); 2 — the boundary between the provinces; 3 — boundaries between districts; 4 — observation points, 5 — volcanoes.

охарактеризован на основании исследования рек и ручьев, относящихся к бассейнам рек: Ича, Шануч, Копылье, Порожистая, Коль, Кихчик, Утка. В Центральном районе названной провинции опробовались реки: Большая Кимитина, Кирганик, Кавыча, Эстребокос, Кашкан, Плотникова и Карымчина. В Юго-Восточном районе Южной провинции изучены воды и донные отложения рек Асача, Вилуча, Паратунка, Порожистая и их притоков, а также р. Халактырка с притоками и руч. Козельский. Опробование донных осадков одних и тех же водотоков проводилось многократно в разные годы в период с

2002 г. по 2016 г. в летне-осеннюю межень, в конце августа начале сентября параллельно с отбором речных вод.

При исследовании химического состава донных отложений, речных вод, почв и пеплов были использованы количественные методы анализа — масс-спектрометрический и атомно-эмиссионный с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS и ICP-AES).

Статистическая обработка результатов (асимметричность, эксцесс и коэффициент асимметрии Пирсона), выполненная для проб с ключевых участков Западного района Северной провинции и Западного района Южной провинции, подтвердила положение (Перельман, 1975; Сае и др., 1990; Соловов и др., 1990) о преимущественном логнормальном распределении содержаний химических элементов в природных средах. В этой связи геохимический фон 52 элементов в донных отложениях и других природных средах выделенных районов Камчатки был определен путем расчета среднегеометрических значений содержаний в них химических элементов (C_p).

Геохимические фоны элементов в компонентах среды региона в целом ($C_{фр}$) рассчитаны как средние арифметические величин C_p элементов всех районов полуострова. Способ расчета учитывал небольшой размах значений C_p у всех элементов.

Для оценки разнообразия химического состава донных осадков разных районов Камчатки для каждого из них выполнены расчеты коэффициентов концентрации элементов (K_c) по формуле $K_c = C_p / C_{фр}$.

Степень зависимости элементного состава донных осадков от геохимического состава речных вод, современных пеплов и почв, развитых на водосборных площадях, установлена путем расчета ранговых коэффициентов корреляции значений K_c названных сред. Данные о валовых содержаниях элементов в поверхностных водах, вулканических пеплах и почвах представлены в табл. 1, 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Общие особенности гидрохимии вод Камчатки. Для природных поверхностных вод Камчатки характерны следующие общие гидрохимические особенности.

Речные воды в основном имеют низкие содержания химических элементов в сравнении с кларками речных вод (табл. 1). Эта особенность роднит их с почвами и пеплами, слагающими почвенно-пирокластический чехол полуострова (Литвиненко, Захарихина, 2008).

Расчет ранговых коэффициентов корреляции по коэффициентам концентраций

Таблица 1. Средние содержания химических элементов в поверхностных водах почвенных провинций Камчатки и кларки речной воды по (Виноградов, 1967), с дополнением по (Бордовский, Иваненко 1979; Гордеев, 1983), мкг/л.

Table 1. Average content of chemical elements in the surface waters of the soil provinces in Kamchatka and clarks of river water according to (Vinogradov, 1967), with addition according to (Bordovsky, Ivanenko 1979; Gordeev, 1983), mcg / l.

Элементы	Кларк	Речные воды					Сфр
		Северная		Южная			
		Западный район, n = 80	Восточный район, n = 57	Западный район, n = 132	Центральный район, n = 76	Юго-Восточный район, n = 32	
Li	2.5	0.84	5.53	1.35	1.48	0.45	1.93
B	20	2.51	87.93	2.44	34.37	13.66	28.18
Na	5000	3136.84	7311.62	2745.99	3788.05	6284.93	4653.49
Mg	2900	1933.63	3017.43	2108.08	1916.15	2133.06	2221.67
Al	160	88.87	958.24	505.58	65.85	48.19	333.35
Si	6000	9525.66	7033.58	5228.07	8273.96	12003.48	8412.95
P _{общ}	40	150.91	114.09	20.98	< 4.5	< 4.5	95.33
S _{общ}	3800	3454.81	8406.23	5051.13	4041.30	1540.70	4498.83
K	2000	685.41	1447.96	828.46	545.95	782.31	858.02
Ca	12000	8596.22	6134.94	7705.38	5136.36	11279.18	7770.42
Ti	3	1.90	4.18	9.74	0.95	1.80	3.714
V	1	1.00	12.95	1.00	1.00	2.54	3.698
Cr	1	1.00	2.14	1.00	1.00	1.00	1.228
Mn	10	7.35	30.96	6.94	2.89	6.88	11.0
Fe	40	154.12	461.89	424.41	85.91	55.94	236.45
Co	0.3	0.13	0.63	0.55	0.09	0.05	0.29
Ni	2.5	0.46	5.30	6.30	0.83	0.46	2.67
Cu	7	1.47	10.49	1.52	2.14	0.49	3.222
Zn	20	1.93	15.67	1.98	10.32	1.31	6.242
Ga	0.1	0.02	0.19	0.10	0.02	0.01	0.068
Ge	0.07	< 0.02	0.04	< 0.02	< 0.02	< 0.02	0.04
As	2	0.17	1.36	0.29	0.33	0.65	0.56
Br	20	< 4	22.52	< 4	< 4	7.34	14.93
Se	0.2	< 0.6	< 0.6	0.51	< 0.6	< 0.6	0.51
Rb	2	0.77	2.44	1.39	0.83	0.73	1.232
Sr	50	25.31	27.47	47.42	71.38	25.43	39.40
Y	0.7	0.08	0.23	0.14	0.05	0.03	0.106
Zr	2.6	< 0.009	0.22	< 0.009	< 0.009	0.02	0.12
Mo	1	1.10	1.29	0.41	0.54	0.26	0.72
Ag	0.2	< 0.01	0.03	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.03
Cd	0.2	< 0.009	0.04	< 0.009	< 0.009	0.01	0.025
Sb	1	0.01	0.25	0.04	0.04	0.03	0.074
Cs	0.03	0.02	0.05	0.07	0.04	0.02	0.04
Ba	30	5.11	13.22	8.70	4.85	1.81	6.738
La	0.05	0.01	0.60	0.10	0.040	0.02	0.154
Ce	0.08	0.04	0.43	0.28	0.058	0.01	0.1636
Pr	0.007	0.01	0.06	0.04	0.009	0.00	0.024
Nd	0.04	0.04	0.25	0.17	0.035	0.02	0.103
Sm	0.008	0.01	0.05	0.04	0.007	< 0.007	0.027
Eu	0.001	< 0.004	0.01	< 0.004	0.003	< 0.004	< 0.004
Gd	0.008	0.01	0.05	0.04	0.008	< 0.004	< 0.002
Tb	0.001	< 0.002	0.01	< 0.002	0.002	< 0.002	0.0194
Dy	0.005	0.01	0.04	0.03	0.007	0.01	< 0.002
Ho	0.001	< 0.002	0.01	< 0.002	0.002	< 0.002	< 0.006

Таблица 1. Окончание.

Er	0.004	< 0.006	0.03	< 0.006	0.005	< 0.006	< 0.002
Tm	0.001	< 0.002	0.01	< 0.002	0.002	< 0.002	< 0.003
Yb	0.004	< 0.003	0.02	< 0.003	0.004	< 0.003	< 0.003
Lu	0.001	< 0.003	0.01	< 0.003	< 0.003	< 0.003	< 0.004
Hf	0.0034	< 0.004	0.01	< 0.004	< 0.004	< 0.004	< 0.01
Ta	0.00125	< 0.01	0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.004
Re	0.0019	< 0.004	0.00	< 0.004	< 0.004	< 0.004	< 0.004
Hg	0.07	< 0.004	0.06	< 0.004	< 0.004	< 0.004	< 0.004
Tl	1	0.23	0.03	0.17	< 0.009	< 0.004	0.143
Pb	1	0.08	1.12	0.01	0.51	0.04	0.352
Bi	—	< 0.006	0.01	< 0.006	< 0.006	< 0.006	0.01
Th	0.1	0.002	0.02	0.02	0.001	0.002	0.009
U	0.5	0.003	0.05	0.02	0.010	0.003	0.0172

Примечание. Исследования выполнены в Аналитическом сертификационном испытательном центре (ООО АСИЦ) ФГУП Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М. Федоровского (Москва).

Note. The studies were performed at the Analytical Certification Testing Center (ASIC LLC) of the Federal State Unitary Enterprise All-Russian Research Institute of Mineral Raw Materials. N.M. Fedorovsky (Moscow).

показал, что качественный состав химических элементов в водах Камчатки не обнаруживает связи с почвенно-пирокластическим чехлом территории. Исключение составляет лишь Юго-Восточный район Южной провинции.

Для почв и пеплов Камчатки характерны относительно повышенные валовые содержания элементов, типичных для вулканических пород среднего и основного составов: Na, Ca, Mg, Cd, Mn, Co, Cu, и низкие содержания элементов, характерных для кислых вулканитов: La, Ce, Pr, Nd, Nb, Hf, Tl, Rb и Th (Литвиненко, Захарихина, 2008). В поверхностных водах полуострова эта закономерность не прослеживается. Чаще в состав элементов с повышенными концентрациями в водах Камчатки входят химические элементы типичные для кислых пород с изменяющимся качественным составом для разных районов (табл. 1).

К общим особенностям гидрогеохимического состава вод Камчатки следует отнести также повышенные содержания железа для всех районов полуострова.

Геохимия донных отложений разных районов Камчатки. Содержания химических элементов в донных отложениях разных районов Камчатки на уровне фона, вне явных геохимических аномалий, значимо не различаются (табл. 2). Коэффициенты концентраций элементов для районов колеблются в пределах от 0.7 до 1.5 единиц, то есть отклоняются от средних показателей для полуострова не более чем на 33% (табл. 3). С другой стороны, наиболее существенные отличия в элементных составах донных осадков свидетельствуют о связи отложений либо с геохимической специализацией рудных проявлений этих территорий, либо со спецификой вулкани-

ческой деятельности, которая формирует в свою очередь особенности геохимии поверхностных горизонтов почв и подстилающих их вулканических пеплов.

Как правило, донные отложения водотоков образуются в результате смешения и наложения разных факторов и природных сред, влияющих на формирование их химического состава (Алекин, 1970). Однако, как показывают наши исследования в районах активного вулканизма на территориях залегания наиболее молодых вулканических пеплов, последние являются основным компонентом среды, определяющим особенности элементного состава современных отложений водотоков.

Расчет коэффициентов ранговой корреляции донных отложений с речными водами, поверхностными почвенными горизонтами и приповерхностными пеплами, их подстилающими, по значениям Кс показал, что состав донных осадков двух районов полуострова: Восточного Северной провинции и Юго-Восточного Южной провинции, обнаруживают тесную связь с молодыми пепловыми горизонтами и почвами на них образованными (табл. 4).

Восточный район Северной провинции является территорией поступления продуктов вулканической деятельности активных вулканов Ключевской группы (Брайцева и др., 2001). В виде присыпок в поверхностные органогенные горизонты почв района регулярно поступают молодые вулканические пеплы современных извержений вулканов: Шивелуч, Толбачик, Безымянный, Ключевская сопка. Сами поверхностные органогенные горизонты подстилаются прослоем андезитовых и базальтовых пеплов вулкана Толбачик извержений 1975–1976 гг.

Таблица 2. Валовые содержания химических элементов в донных отложениях, приповерхностных вулканических пеплах и почвах разных районов Камчатки (Ср) и средние содержания элементов в этих средах в целом для региона (Сфр).

Table 2. Gross contents of chemical elements in bottom sediments, near-surface volcanic ashes and soils in different areas of Kamchatka (Ср) and average contents of elements in these environments for the region in general (Сфр).

Элементы	Северная провинция						Южная провинция						Сфр					
	Западный район		Восточный район		Западный район		Центральный район		Юго-Восточный район		донные, n = 76	пеплы, n = 55				почвы n = 30		
	донные, n = 80	пеплы, n = 30	донные, n = 57	пеплы, n = 50	донные, n = 132	пеплы, n = 40	донные, n = 76	пеплы, n = 55	донные, n = 32	пеплы, n = 30			почвы n = 30					
Li	16.63	20.98	10.63	13.12	11.29	11.28	22.65	16.49	11.52	21.00	17.86	10.61	11.19	9.93	6.71	16.92	15.31	10.15
Na	1.69	2.91	1.6	2.68	2.13	2.1	2.02	1.99	1.38	2.26	2.48	1.9	2.32	2.19	1.26	2.19	2.34	1.65
Mg	1.58	1.12	0.79	2.94	2.51	2.6	1.85	1.04	0.79	1.79	0.79	1.34	2.38	2.05	1.2	2.11	1.50	1.34
Al	8.50	6	4.44	9.62	7.89	7.77	8.33	6.8	4.97	10.79	7.26	6.4	11.28	7.98	4.88	9.70	7.19	5.69
K	0.90	2.01	0.88	1.28	0.88	0.96	0.91	1.11	0.83	1.59	1.37	0.85	0.60	0.66	0.55	1.05	1.21	0.81
Ca	3.02	2.27	1.85	5.63	5.4	5.33	2.42	2.55	2.11	3.38	2.19	3.42	5.29	4.45	3.1	3.95	3.37	3.16
Ti	0.63	0.21	0.21	0.69	0.52	0.48	0.51	0.53	0.36	0.44	0.37	0.36	0.50	0.39	0.26	0.55	0.40	0.33
Be	0.69	—	0.57	0.69	—	0.6	1.08	—	0.67	0.83	—	0.57	0.49	—	0.37	0.76	—	0.56
Sc	20.72	—	8.97	20.38	—	21.99	15.30	—	10.54	15.18	—	16.61	21.80	—	15.53	18.68	—	14.73
V	227.3	65.5	79.9	207.9	180.3	168.2	151.8	139.6	97.6	136.0	83.3	111.2	244.0	149.7	92.2	193.4	123.7	109.8
Cr	62.32	44.99	45.68	78.22	61.68	65.48	122.73	24.49	22.18	62.85	10.49	21.99	34.57	35.6	19.85	72.14	35.45	35.04
Mn	0.12	0.05	0.07	0.11	0.11	0.11	0.08	0.09	0.09	0.10	0.1	0.13	0.11	0.12	0.1	0.10	0.09	0.10
Fe	6.54	2.17	2.08	5.47	5.33	5.21	4.45	3.7	2.71	5.00	3.31	3.71	4.91	4.8	3.05	5.28	3.86	3.35
Co	21.92	8.6	9.65	23.88	22.97	22.35	20.48	13.27	0.27	17.18	9.48	13.65	20.48	16.3	10.76	20.79	14.12	11.34
Ni	30.39	17.32	20.13	33.39	21.66	24.44	61.14	8.97	0.13	23.00	6.05	12.86	19.97	12.67	8.81	33.58	13.33	13.27
Си	56.91	31.98	32.04	66.39	57.44	56.64	41.25	41.13	5.02	50.42	25.15	39.6	46.41	32.52	33.83	52.28	37.64	33.43
Zn	87.97	48.74	57.53	79.50	81.7	75	84.06	80.38	0.08	91.85	86.39	85.89	101.42	65.5	65.31	88.96	72.54	56.76
Ga	16.17	16	11.1	17.30	17.29	16.27	15.36	24.68	0.84	15.58	19.99	15.17	17.94	17.34	10.7	16.47	19.06	10.82
As	7.50	11.34	5.79	2.46	1.83	1.28	3.79	7.73	0.6	9.24	5.01	2.86	3.13	3.11	3.31	5.23	5.80	2.77
Rb	15.25	36.99	16.63	17.49	16.33	17.6	23.24	32.5	30.9	33.83	31.47	19.93	10.49	12.47	13.91	20.06	25.95	19.79
Sr	338.1	28983	209.2	399.5	30922	321.1	324.4	21024	177.0	373.6	22480	238.5	357.0	26866	186.5	358.5	26055	226.5
Y	15.15	8.05	7.02	17.30	16.49	15.67	14.60	20.9	10.51	14.60	22.84	16.32	16.74	16.09	12.15	15.68	16.87	12.33
Zr	134.2	224.9	118.1	177.8	142.3	142.3	39.7	180.0	82.8	112.2	175.5	122.8	103.9	99.6	78.7	113.6	164.4	108.9
Nb	4.99	—	3.16	3.18	—	2.54	8.06	—	3.83	6.28	—	2.76	2.54	—	1.71	5.01	—	2.80
Mo	1.15	3.09	2.1	1.15	0.98	0.99	0.87	2.1	1.75	1.52	2.52	1.56	1.13	1.25	1.07	1.16	1.99	1.49
Cd	0.15	0.1	0.24	0.16	0.19	0.17	0.15	0.21	0.26	0.25	0.19	0.23	0.21	0.16	0.2	0.19	0.17	0.22
Sn	1.32	—	1.64	1.76	—	1.15	2.12	—	1.96	2.59	—	1.32	2.21	—	1.08	2.00	—	1.43
Sb	1.07	1.15	0.47	0.39	0.41	0.37	0.32	0.57	0.46	2.02	0.55	0.38	0.94	0.59	0.35	0.95	0.65	0.41
Cs	1.23	1.65	1.28	0.72	0.61	0.63	1.58	2.1	2.14	2.50	1.73	1.06	0.89	0.88	1.03	1.38	1.39	1.23

ОСОБЕННОСТИ ГЕОХИМИИ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

Таблица 2. Окончание.

Va	401.2	529.2	312.7	362.2	355.7	361.5	303.6	425.0	325.1	503.0	452.0	358.9	264.1	222.5	214.0	366.8	396.9	314.4
La	7.55	9.49	6.05	7.98	6.41	6.72	12.74	8.66	6.2	11.36	9.72	5.95	6.70	4.55	4.34	9.27	7.77	5.85
Ce	19.45	20.45	12.96	19.42	15.28	16.1	25.33	20.35	13.51	25.38	23.01	14.61	15.08	11.27	10.21	20.93	18.07	13.48
Pr	2.51	2.59	1.66	2.91	2.32	2.37	3.66	2.8	1.68	3.26	3.11	2.04	2.33	1.7	1.43	2.94	2.50	1.84
Nd	11.69	9.78	7.08	13.22	10.63	10.84	15.11	12	7.19	13.31	13.21	9.11	10.64	7.74	6.32	12.79	10.67	8.11
Sm	2.91	1.94	1.57	3.53	2.87	2.83	3.43	3.09	1.73	3.21	3.48	2.45	2.95	2.23	1.72	3.21	2.72	2.06
Eu	0.92	0.6	0.53	1.17	0.97	0.94	1.11	0.91	0.56	1.10	1.07	0.81	1.09	0.78	0.59	1.08	0.87	0.69
Gd	2.87	1.84	1.63	3.72	3.2	3.1	3.46	3.43	1.92	3.24	3.97	2.83	3.50	2.62	1.98	3.36	3.01	2.29
Tb	0.44	0.28	0.25	0.59	0.52	0.48	0.51	0.57	0.31	0.52	0.65	0.48	0.57	0.43	0.33	0.53	0.49	0.37
Dy	2.68	1.54	1.48	3.72	3.06	2.95	2.93	3.43	1.82	3.03	4.03	2.81	3.56	2.66	2.02	3.18	2.94	2.22
Ho	0.54	0.33	0.29	0.73	0.64	0.6	0.57	0.74	0.39	0.61	0.84	0.6	0.72	0.56	0.44	0.63	0.62	0.46
Er	1.59	0.93	0.85	2.15	1.88	1.77	1.61	2.24	1.39	1.73	2.63	1.85	2.10	1.73	1.33	1.84	1.88	1.44
Tm	0.24	0.14	0.13	0.32	0.27	0.26	0.23	0.35	0.18	0.26	0.4	0.27	0.31	0.26	0.19	0.27	0.28	0.21
Yb	1.50	0.97	0.87	2.18	1.78	1.71	1.56	2.24	1.2	1.79	2.65	1.78	2.08	1.74	1.31	1.82	1.88	1.37
Lu	0.23	0.16	0.13	0.31	0.28	0.26	0.22	0.36	0.19	0.25	0.41	0.28	0.32	0.27	0.2	0.27	0.30	0.21
Hf	2.40	3.57	2	3.04	2.09	2.12	0.88	2.7	1.52	2.17	2.86	1.93	2.25	1.58	1.24	2.15	2.56	1.76
Ta	0.48	—	—	0.20	—	—	0.47	—	—	0.43	—	—	0.22	—	—	0.36	—	—
W	0.38	—	0.43	0.61	—	0.27	0.70	—	0.8	0.73	—	0.32	0.43	—	0.34	0.57	—	0.43
Tl	0.16	0.34	0.24	0.11	0.11	0.13	0.16	0.36	0.26	0.25	0.25	0.18	0.09	0.1	0.14	0.15	0.23	0.19
Pb	5.73	10	6.7	5.36	4.98	5.02	9.67	11.22	9.82	12.12	10.04	6.7	9.70	5.56	7.96	8.52	8.36	7.24
Bi	0.09	0.14	0.12	0.06	0.07	0.08	0.10	0.28	0.26	0.15	0.19	0.13	0.07	0.08	0.11	0.10	0.15	0.14
Th	1.09	2.05	0.99	1.02	0.74	0.84	1.94	1.77	1.46	2.30	2.09	1.06	1.00	0.69	0.76	1.47	1.47	1.02
U	0.48	1.25	0.58	0.62	0.49	0.6	0.69	0.84	0.7	0.89	1.05	0.55	0.45	0.34	0.32	0.63	0.79	0.55

Примечание. Содержание Na, Mg, Al, K, Ca, Ti, Mn, Fe в %, остальные элементы — в мг/кг. Содержание Se, Rh, Pd, Ag, Re, Ir, Pt, Au ниже предела обнаружения ICP анализа. «—» — нет данных. Исследования выполнены в Аналитическом сертификационном испытательном центре (ООО АСИЦ) ФГУП Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М. Федоровского (Москва).

Note. The contents of Na, Mg, Al, K, Ca, Ti, Mn, Fe in%, the remaining elements — in mg/kg. The contents of Se, Rh, Pd, Ag, Re, Ir, Pt, Au are below the detection limit of the ICP analysis. "—" — no data. The studies were performed at the Analytical Certification Testing Center (ASIC LLC) of the Federal State Unitary Enterprise All-Russian Research Institute of Mineral Raw Materials. N.M. Fedorovsky (Moscow).

Таблица 3. Коэффициенты концентраций (Kc) содержаний элементов для донных отложений разных районов Камчатки.

Table 3. The concentration ratios (Kc) of the contents of elements for bottom sediments in different areas of Kamchatka.

Провинция	Район	Геохимическая формула донных отложений	
		Kc ≥ 1	Kc < 1
Северная	Западный	As(1.5)-Ta(1.3)-Fe(1.3)-Zr,V,Mn(1.2)-Ti, Sb, Hf, Sc, Ba, Cu, Co(1.1)-Tl, Nb, Bi, Mo, Zn, Li, Ga, Y(1.0)	Sr, Ce, Nd, Be, Sm, Ni, Cs, Tm, Al, Lu, Er, Cr, Pr, K, Ho, Gd, Eu(0.9)-Dy, Tb, Yb, La, Cd, Na, Ca, U, Rb, Mg(0.8)-Th, Pb, W, Sn(0.7)
	Восточный	Zr(1.6)-Ca, Hf, Mg, (1.4)-Cu, Ti,(1.3)-Na, K, Yb, Lu, Tm, Er, Dy, Ho(1.2)-Co, Tb, Sr, Gd, Y, Sm, Sc, Eu, Cr, W, V, Mn, Ga(1.1)-Fe, Nd, Ni, Al, U, Mo, Pr, Ba(1.0)	Ce, Be, Zn, Sn, Cd, Rb, La(0.9)-Li, Tl(0.8)-Th, Bi(0.7)-Nb, Pb, Ta, (0.6)-Cs, As(0.5)-Sb(0.4)
Южная	Западный	Ni(1.8)-Cr(1.7)-Nb(1.6)-Be, La(1.4)-Li, Th, Ta(1.3)-Pr, W, Ce, Nd, Rb(1.2)-Cs, Pb, U, Sm, Sn, Bi(1.1)-Gd, Tl, Eu, Co, Tb(1.0)	Zn, Ga, Y, Dy, Na, Ti, Sr, Ho, Mg, Er, K, Al, Tm, Yb(0.9)-Fe, Lu, Ba, Cd, Sc, Cu, V(0.8)-Mo, Mn, As(0.7)-Ca(0.6)-Hf(0.4)-Zr, Sb(0.3)
	Центральный	Sb(2.1)-Cs, As(1.8)-Rb, (1.7)-Tl, Bi, Th(1.6)-K(1.5)Pb, U, Ba, Cd(1.4)-Mo, Sn, W, Nb(1.3)-Li, La, Ce, Ta(1.2)-Al, Pr, Be(1.1)-Sr, Nd, Zn, Na, Eu, Hf, Sm, Zr, Yb, Tb, Gd, Cu, Ho, Dy, Tm(1.0)	Fe, Ga, Er, Lu, Mn, Y, Cr, Ca, (0.9)-Mg, Co, Sc(0.8)-V, Ni(0.7)
	Юго-Восточный	Ca, V(1.3)-Lu, Sc, Al(1.2)-Cd, Er, Yb, Zn, Pb, Tm, Ho, Mg, Dy, Sn, Mn, Ga, Tb, Y, Na(1.1)-Hf, Gd, Eu, Sb, Sr, Co, Mo(1.0)	Fe, Sm, Zr, Ti, Cy(0.9)-Nd, Pr, W, (0.8)-U, La, Ce, Ba, Bi, Th, Li, Be(0.7)-Cs, Ta, As, Ni, Tl, K(0.6)-Rb, Nb, Cr(0.5)

Таблица 4. Коэффициенты ранговой корреляции (по значениям Kc) донных отложений с природными средами.

Table 4. Rank correlation coefficients (for Kc values) of bottom sediments with natural environments.

Природные среды	Донные отложения				
	Северная провинция		Южная провинция		
	Западный район, n = 80	Восточный район, n = 57	Западный район, n = 132	Центральный район, n = 76	Юго-Восточный район, n = 32
Речные воды (n = 34, r = 0.339)	0.071	-0.460	0.390	0.275	0.024
Почвы (n = 51, r = 0.268)	0.185	0.689	0.263	-0.512	0.636
Приповерхностный пепел (n = 46, r = 0.298)	0.046	0.524	0.148	0.223	0.598

и вулкана Безымянный извержения 1956 г. (далее приповерхностные пеплы ПП), возраст ПП ~55 лет. Общий усредненный состав современных пеплов несколько более кислый, чем состав почвообразующих ПП, так как большую долю в нем составляют андезитовые пеплы наиболее часто повторяющихся извержений вулкана Шивелуч. Масса поступающего пепла

в среднем от первых сотен граммов до первых десятков кг/м², их поступление в почву повышает ее зольность и влияет на химический состав почвы.

Тесную связь донные отложения водотоков района обнаруживают как с почвами, так и с ПП. Коэффициенты ранговой корреляции между значениями Kc для донных осадков и поверх-

ностных почв территории составляет 0.689, для отложений и ПП — 0.524, при количестве использованных данных $n = 51$, $r5\%_{\text{крит}} = 0.268$ (табл. 4).

Имеющий самый высокий показатель $K_c = 1.6$ в донных отложениях Zr (табл. 3) присутствует также в повышенных содержаниях в поверхностных почвах района (табл. 2), содержащих существенную присыпку молодых пеплов вулкана Шивелуч, в которых содержания Zr превышает кларк элемента для средних пород в 2 раза (Захарихина, Литвиненко, 2016). Наиболее показательным свидетельством связи донных отложений района с молодым вулканизмом следует признать вхождение в число приоритетных элементов с $K_c = 1.4$ — Ca и Mg. Названные элементы в целом характерны в повышенных содержаниях для почв Камчатки (в сравнении с кларками почв) и в максимальных количествах содержатся как в почвах, так и в пеплах районов проявления молодого вулканизма. Обращает на себя внимание вхождение в число приоритетных химических элементов 11 редкоземельных элементов (РЗЭ): Yb, Lu, Tm, Er, Dy, Ho, Gd, Y, Sm, Eu, Pr. Ранее установлено, что данная особенность также обусловлена влиянием на геохимию природных сред молодого вулканизма (Литвиненко, Захарихина, 2015а). При изучении снежного покрова вблизи вулканов северной группы были обнаружены высокие концентрации РЗЭ в талых водах из горизонтов снега, обогащенных продуктами извержений вулканов Шивелуч, Толбачик, Ключевская сопка, обнаруживающие падения сумм РЗЭ с удалением от вулканов (Литвиненко, Захарихина, 2015а).

Юго-Восточный район Южной провинции так же, как и Восточный район Северной провинции является территорией распространения молодых вулканических пеплов. Поверхностные органогенные горизонты почв образованы здесь на пеплах андезибазальтового состава извержения вулкана Ксудач в 1907 г. (Bursik et al), мощность их составляет от 11–20 см на юге территории до 3–5 см в окрестностях г. Петропавловск-Камчатский.

Главное сходство района с территорией окрестностей вулканов Ключевской группы состоит в тесной связи геохимии донных отложений с химическим составом почв и ПП. Коэффициент ранговой корреляции показателей K_c для донных осадков и поверхностных почв имеет значение 0.636, для осадков и ПП — 0.598, при $r5\%_{\text{крит}} = 0.268$ ($r5\%_{\text{крит}}$ — критическое значение коэффициента корреляции для 5% доверительного интервала) (табл. 4). В состав приоритетных элементов также входят Ca и Mg, характерные, как уже отмечено, для районов проявления молодого вулканизма.

Смешанный спектр приоритетных химических элементов для поверхностных почв района (типичных как для основных Ca, V, Cd, так и для кислых пород Lu, Sc, Al), повторяющийся в донных осадках, объясним особенностью строения почв территории на глубину. Последние включают четыре органогенных горизонта. Поверхностный подстилается андезибазальтовым пеплом. Средняя и нижняя части профиля этих почв залегают в кислых риолито-дацитовых вулканических пеплах извержений вулканов Южной Камчатки (Ксудач, Опала).

Западный район Северной провинции является территорией, для которой характерно распространение золотосеребряных рудных объектов (Карта ..., 1999). Данная специфика района обуславливает наличие в ряду приоритетных элементов для донных осадков с самым высоким показателем $K_c = 1.5$ типичного элемента-спутника оруденения — As.

Для территории характерны также незначительные по объему присыпки пеплов дальнего переноса современных извержений вулкана Шивелуч, аналогичные по химическому составу пеплам, поступающим на водосборные площади рек Восточного района этой провинции. Влияние продуктов вулканической деятельности на состав донных отложений Западного района существенно ниже, но пеплы дальнего переноса определяют сходство донных отложений по составу приоритетных элементов, в который так же, как и вблизи вулканов входят: Zr, V, Mn, Ti, Hf, Cu, Co. Многофакторность формирования донных осадков проявляется в наложении влияния на их состав вулканической деятельности и особенностей геохимии геологического основания, что нарушает геохимические связи современных отложениях рек с отдельными компонентами среды (табл. 4). Однако, статистически не значимая, но относительно наиболее тесная связь донных осадков отмечается здесь с поверхностными почвами.

Самый богатый геохимический состав донных отложений характерен для Центрального района Южной провинции (Центральная Камчатская Депрессия, долина р. Камчатка). Из 52 изученных химических элементов для 38 установлены значения K_c , превышающие или равные единице, 16 элементов имеют значение K_c от 1.3 до 2.1 (табл. 3). Состав приоритетных химических элементов с наиболее высокими значениями обсуждаемого показателя свидетельствует о преимущественной связи геохимии донных осадков с рудоносными площадями, характерными для водосборных площадей рек этого района. В центральной части восточных склонов Срединного хребта полуострова, откуда поступают левые притоки р. Камчатка, распространена золотосе-

ребряная рудоносная площадь, объединяющая несколько месторождений (Карта ..., 1999). Этим фактором объяснимо ведущее положение в ряду приоритетных элементов для донных отложений района типичных элементов-спутников золото-серебряного оруденения: Sb и As со значениями показателя Кс 2.1 и 1.8 единиц, соответственно.

Подтверждением зависимости качественного состава донных отложений района от особенностей его рудной геологии являются данные поисково-съёмочных работ масштаба 1:200000³, ² и крупнее, проводившихся здесь в разные годы. Для аномальных геохимических полей (АГП) этой территории выделена Au-Hg-As-Sb-(Ag) ассоциация, указывающая на золото-сурьмяно-ртутную и золото-серебряную рудные формации.

Наиболее тесная геохимическая связь донных отложений района установлена с речными водами и приповерхностными вулканическими пеплами. Последние образованы риолито-дацитовыми позднеголоценовыми продуктами извержения вулкана Опала ~1400 лет назад. Пепел названного вулканического события легко узнаваем во всех компонентах среды, имеет характерную палевую окраску, повсеместное распространение по всем элементам рельефа, довольно выдержанную мощность. За счет легкого объемного веса и сравнительно рыхлого сложения он часто наблюдаем в переотложенном состоянии на поверхности почв, в нехарактерных горизонтах внутри почвенного профиля и нередко узнаваем в составе донных осадков водотоков.

Риолито-дацитовый состав ПП Центрального района Южной провинции определяет спектр их приоритетных химических элементов, типоморфных для кислых горных пород: Th, Nb, Sn, U, Ce, Mo, Bi. Последняя закономерность повторяется также и для донных отложений, Кс для этих элементов составляют в них значения от 1.6 до 2.1 единиц. Отличает данный район от других территорий полуострова отрицательная корреляция между почвами и донными осадками. Это свидетельствует о преимущественном образовании последних не путем отложения материала из поверхностных органогенных горизонтов, а скорее путем сноса вещества из «легких и сыпучих» ПП извержения вулкана Опала.

Выделяется также относительно богатым геохимическим составом донных отложений Западный район Южной провинции (западное побережье Камчатки). Количество приоритет-

ных химических элементов для донных отложений этой территории (24 из 52 изученных) ниже, чем в Центральном районе. Однако значения Кс для элементов также достаточно высокие и составляют для 8 из них значения от 1.8 до 1.3 единиц. Данная территория наиболее удалена от активных вулканов региона, что определило самую незначительную мощность ее почвенно-пирокластического чехла, включающего всего два пепловых горизонта. Если для большей территории Камчатки мощность вулканических почв, перекрывающих подстилающие горные породы, составляет в среднем 1–1.5 м, то на Западном побережье полуострова почвы имеют мощность не более 30–40 см (Шоба, Захарихина, 2003). То есть горные породы здесь не перекрываются многочисленными пепловыми и почвенными горизонтами, как в других районах, и оказывают большее влияние на формирование геохимии речных вод и донных осадков. Для территории характерно наличие медно-никелевых рудопоявлений и одного медно-никелевого месторождения, выделяемых в Камчатскую никеленосную провинцию (Трухин и др., 2008), приуроченную к Срединно-Камчатскому массиву, простирающемуся на 200 км в меридиональном направлении (Селянгин, 2018). В этой связи в состав приоритетных элементов в донных отложениях и водах для района входит Ni, содержания которого превышает кларк для речных вод в 2.5 раза (табл. 1), а значение Кс для донных осадков составляет 1.8 единиц. По данным литохимических съёмок здесь также выделяются аномальные геохимические поля (АГП)^{2, 4, 5} с аномальными концентрациями Ni в донных отложениях, по которым прогнозируются рудные поля (узлы) медно-никелевой рудной формации.

В ряду приоритетных элементов высокие позиции занимают также семь РЗЭ: La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, сопутствующие медно-никелевому оруденению Камчатки (Литвиненко,

⁴ Бояринова М.Е. Отчет о результатах геологического доизучения заснятых площадей с целью создания комплектов Государственной геологической карты РФ масштаба 1:200000, 2002. N-57-VIII, XIV. Федеральное государственное унитарное геологическое предприятие «Камчатская поисково-съёмочная экспедиция». Геологическое доизучение.

⁵ Сидоренко В.И. Отчет о геологическом доизучении ранее заснятых площадей и подготовке к изданию комплекта Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1:200 000 2000. N-57-VIII, XIV. Федеральное государственное унитарное геологическое предприятие «Камчатская поисково-съёмочная экспедиция». Геологическое доизучение. М-б 1:200 000.

³ Вдовенко В.П. Геологическое строение и полезные ископаемые. Камчатское территориальное геологическое управление. Геологосъёмочная экспедиция (ГСЭ). N-57-IV, Геологическая съёмка. М-б 1:200 000, 1977.

Захарихина, 2015б). Кроме того, для данной территории присуще развитие углистых сланцев, которые, как известно, также обогащены РЗЭ.

Западный район Южной провинции является единственной территорией Камчатки, где обнаруживается статистически значимая положительная корреляция геохимического состава донных отложений и гидрогеохимического состава речных вод. Указанная геохимическая связь между этими средами может быть объяснена следующими факторами:

- небольшой мощностью почвенно-пирокластического чехла и, как следствие, образованием донных отложений главным образом за счет пород геологического основания;

- преимущественно подземным питанием (до 70%) речных вод района (Жилин и др., 2009), приводящим к преобладающей роли геологических пород в формировании их микроэлементного состава;

- фактически отсутствием поступления продуктов вулканизма как дополнительных источников химических элементов для природных вод.

Факторы, определяющие геохимию донных осадков в условиях вулканизма. Отличия элементного состава донных осадков разных районов Камчатки указывают на различия ведущих факторов их образования.

В районах молодого синлитогенеза, испытывающих влияние регулярного поступления молодых продуктов вулканической деятельности (Восточный район Северной провинции, окрестности вулканов Ключевской группы) и на территориях, где поверхностные почвенные горизонты залегают на молодых вулканических пеплах (Юго-Восточный район Южной провинции, возраст ПП ~110 лет), главным фактором, формирующим геохимию донных осадков, является вулканизм. Приоритетность последнего подтверждается положительными корреляционными зависимостями геохимии донных осадков этих районов с химическими составами ПП и почв, на них образованных.

В зависимости от степени преобразованности ПП в почвенном профиле выполняют ту или иную функцию как генетические горизонты. Они могут являться почвообразующими (С), быть элювиальными (Е) (горизонт вымывания химических соединений), или напротив иллювиальными (В) (горизонт вмывания органоминеральных соединений, образованных на поверхности) и даже гумусово-аккумулятивными (А1). Весь профиль вулканической почвы является единым естественноисторическим телом, функционирующим как система взаимосвязанных и взаимозависимых минеральных и органогенных генетических почвенных горизонтов.

ПП районов молодого вулканизма, как правило, выполняют функцию почво-подстилающих горизонтов, не вовлеченных в процессы почвообразования. Так в Юго-Восточном районе Южной провинции пепел, на котором сформировался поверхностный органогенный горизонт почв, имеет достаточно грубый гранулометрический состав (крупный песок с дресвой), молодой даже для почвенных процессов возраст (110 лет — период с момента извержения вулкана Ксудач в 1907 г.), мощность его варьирует от 11–20 см на юге территории и до 3–5 см в окрестностях г. Петропавловск-Камчатский. Залегающий на нем почвенный горизонт хорошо отслаивается от пепла. ПП района фактически не обнаруживают морфологических признаков вовлечения их в процессы почвообразования и гипергенеза. Все эти факторы способствуют тому, что формирование донных осадков района происходит преимущественно из ПП.

На тесную связь донных отложений с ПП и почвами двух районов молодого вулканизма указывают также отношение содержания элементов в донных осадках к их концентрациям в почвах и вулканических пеплах (табл. 5). Значения данных показателей для большинства изученных элементов близки к единице. То есть сходство донных осадков, ПП и почв проявляется не только в приоритетности элементов, ранжированных по показателю K_s , но и в абсолютных их содержаниях.

На территориях, где поверхностный почвенный горизонт залегают на значительно более древних и тонких пеплах, где последние являются гумусово-аккумулятивными (Западный район Южной провинции), почвообразующими (Центральный район Южной провинции), или элювиальными (Западный район Северной провинции) горизонтами, поступление ПП, проработанных процессами почвообразования и гипергенеза в состав донных осадков затруднительно. Современные отложения рек имеют здесь более сложный генезис и связь с разными компонентами среды. За счет этого, корреляционных зависимостей геохимии донных отложений с концентрациями элементов в отдельных природных средах здесь не наблюдается.

Состав приоритетных элементов (по показателю K_s) и степень их накопления в донных отложениях таких районов обнаруживают сходство геохимии донных осадков с подстилающими горными породами, в том числе включающими рудные зоны. Так на Западном побережье Камчатки (Западный район Южной провинции) в районе распространения медно-никелевых проявлений наряду с приоритетностью содержания в донных осадках Ni наблюдается также относительное накопление рудных элементов

Таблица 5. Геохимические формулы донных отложений по показателям нормирования в них элементов относительно вулканических пеплов и почв.

Table 5. Geochemical formulas of bottom sediments in terms of the rationing of elements in them relatively to volcanic ashes and soils.

Показатели	>3	<3-1	<1-0.3	<0.3-0.1
Западный район Северной провинции				
Сдонные/ Спеллы	V-Fe-Ti	Co-Mn-Y-Zn-Cu-Ni-Dy-Er-Tm-Ho-Tb-Gd-Yb-Eu-Sm,Cd-Lu-Al-Mg-Cr-Ca-Nd-Sr-Ga	Pr-Ce-Sb-La-Li-Ba-Cs-Bi-Hf-As-Zr-Na-Pb-Th-Tl-KRb-U-Mo	—
Сдонные/ Спочвы	Fe-Ti	V-Sb-Co-Y-Mg-Al-Er-Ho-Sm-Tm-Dy-Lu,Cu-Tb-Gd-Eu,Yb-Mn-Nd-Ca-Sr-Li-Zn-Pr,Ni-Ce-Ga-Cr-As-Ba-La-Hf-Zr-Th-Na-K	Cs-Rb-Pb-U-Bi-Tl-Cd-Mo	—
Восточный район Северной провинции				
Сдонные/ Спеллы	—	Ni-Hf-K-Th-As-Ti-Sr-Ce,Cr,U-Na-Pr,Zr,La-Nd-Sm,Yb-Al-Dy,Eu-Cs,Mo-Tm,Mg-Li,Gd,Cu-V,Er-Ho-Tb-Lu-Pb-Rb-Y-Ca,Co,Tl-Fe-Ba-Ga,Mn	Zn-Sb-Bi-Cd	—
Сдонные/ Спочвы	—	As-Ti-Hf-Ni-K-Yb-Na-Dy-Zr,Sm,Eu-Sr,Al,V-Pr,Tb-Nd,Ho,Tm,Er-Th,Lu,Ce-Gd-Cr,La-Cu,Mo-Li-Cs-MgY-Pb,Co-Ga,Zn,Ca-Fe,Sb-U-Ba,Mn	Rb-Cd-Tl-Bi	—
Западный район Южной провинции				
Сдонные/ Спеллы	Ni-Cr	Mg-Co-Sr-La-Li-Pr-Nd-Ce-Al,Eu-Fe-Sm-Th-V-Zn-Na-Gd-Cu	Ti-Ca-Tb-Pb,Dy-Mn-U-K-Ho-Cs-Cd-Er,Rb-Ba-Y,Yb-Tm-Ga-Lu-Sb-As-Tl-Mo-Bi-Hf	Zr
Сдонные/ Спочвы	Ni-Cr	Mg-Pr-Nd-La-Sm-Eu,Li-Co-Ce-Sr-Gd-Al-Tb-Fe-Dy-V-Cu-Ho-Na-Ti-Y-Th-Yb-Tm-Lu,Er-Ca-K-Ga	Pb,U-Ba,Zn-As-Mn-Rb-Cs-Sb-Tl-Cd-Hf-Mo-Zr-Bi	—
Центральный район Южной провинции				
Сдонные/ Спеллы	Cr-Ni-Sb	Mg-Cu-As-Co-Sr-V-Ca-Fe-Al-Cs-Cd-Pb-Ti-Li-La-K-Ba-Ce,Th-Rb-Zn-Pr-Eu-Nd	Tl-Mn-Sm-Na-U-Gd-Tb-Bi-Ga-Hf-Dy-Ho-Yb-Er-Tm-Zr-Y-Lu-Mo	—
Сдонные/ Спочвы	Sb-As	Cr-Cs-Th-Li-La-K-Pb-Ni-Ce-Rb-Al-U-Pr-Sr-Nd-Ba-Tl,Eu-Fe-Mg-Sm-Cu-Co-V-Ti-Na-Bi-Gd-Hf-Cd-Dy,Tb-Zn-Ga-Ho,Yb	Ca-Mo-Tm-Er-Zr-Lu-Y-Mn	—
Юго-Восточный район Южной провинции				
Сдонные/ Спеллы	—	Pb-V-Sb-Ni-Zn-La-Th-Cu-Hf-Al-Eu-Nd,Pr-Ce,Dy,Gd,Cd-U,Sr-Sm,Tb-Ho,Ti-Co-Er-Yb,Ca,Ba-Tm-Lu-Mg-Li-Na-Zr,Y-Ga-Fe-As,Cs	Cr-Mn-K-Mo-Tl-Rb-Bi	—
Сдонные/ Спочвы	—	Sb-V-Al-Ni-Mg-Ti-Sr-Co-Eu-Na-Hf-Gd-Dy-Cr-Tb-Sm,Ca-Nd,Ga-Li-Ho,Pr-Tm-Fe-Yb-Er,Lu-Zn-La-Ce-U-Y-Cu-Th,Zr-Ba-Pb-Mn-K-Cd-Mo	As-Cs-Rb-Tl-Bi	—

Примечание: элементы в интервалах значений расставлены в порядке убывания через дефис, при равных значениях — через запятую.

Note. The elements in the intervals of values are arranged in descending order in hyphenated form, with equal values are separated by commas.

в сравнении с почвами и ПП. При нормировании концентраций Ni в донных осадках на его содержания в ПП и почвах получены значения 6.8 и 5.5 единиц, соответственно, а для элемента спутника руд Cr — 5.0 и 5.5 (табл. 5).

В Центральной Камчатке, для которой характерно распространение преимущественно золотосеребряных руд, в донных осадках отмечается приоритетность элементов спутников

оруденения Sb и As. На их накопление в донных осадках указывают высокие значения превышений их содержаний в донных отложениях относительно ПП и почв, составляющие значения для Sb 3.7 и 5.3 и As 1.8 и 3.2 единиц, соответственно.

Все перечисленные элементы, указывают на ведущую роль формирования состава донных отложений геологического основания, включающего рудные объекты, что определяет

максимально высокие значения показателей нормирования донных осадков относительно ПП и почв. Наглядно эту особенность отражают приведенные геохимические формулы (табл. 5). Разброс показателей нормирования (максимумы и минимумы значений) для Центрального района Южной провинции существенно больше, чем в районах проявления молодого вулканизма (табл. 5).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Элементный состав донных отложений речной сети разных районов полуострова Камчатка существенно не различается. Однако наиболее значимые отличия в составах донных осадков свидетельствуют о связи состава отложений либо с геохимией геологического основания, включающего рудные проявления, либо со спецификой вулканической деятельности.

Оценка коэффициентов концентраций (Кс) химических элементов в донных отложениях, степень их накопления относительно почв и пеплов показала, что наиболее обогащены элементами донные отложения территорий развития рудных месторождений региона. Выделяются относительно повышенными содержаниями химических элементов осадки Центральный район Южной провинции (долина р. Камчатка), где распространена золотосеребряная рудоносная площадь. Ведущее положение в ряду приоритетных элементов для современных отложений речной сети занимают здесь типичные элементы-спутники оруденения: Sb и As со значениями показателя Кс 2.1 и 1.8 единиц, соответственно.

Для Западного района Южной провинции (западное побережье Камчатки) характерно наличие медно-никелевых рудопроявлений и одного медно-никелевого месторождения. В этой связи в состав приоритетных элементов в донных отложениях и водах для района входит Ni, содержания которого превышает кларк для речных вод в 2.5 раза (табл. 1), а значение Кс для донных осадков составляет 1.8 единиц.

В районах проявления активного вулканизма и на территориях распространения молодых слабо-преобразованных вулканических пеплов состав донных осадков определяется геохимией почв и составом приповерхностных пеплов, на которых последние образованы. Коэффициенты ранговой корреляции по показателям Кс для донных осадков, приповерхностных пеплов и поверхностных почв во всех случаях существенно превышают статистически значимые значения. Свидетельством связи донных отложений с молодым вулканизмом является наличие для них в числе приоритетных элементов Ca и Mg,

которые характерны в повышенных содержаниях для всех сред территорий проявления молодого вулканизма. Для Восточного района Северной провинции (район поступления продуктов вулканической деятельности активных вулканов Ключевской группы) связь с вулканизмом подтверждается также накоплением в донных отложениях 11 редкоземельных элементов: Yb, Lu, Tm, Er, Dy, Ho, Gd, Y, Sm, Eu, Pr.

Список литературы [References]

- Алекин О. А.* Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 413 с. [*Alekin O. A.* Basics of hydrochemistry. L.: Hydrometeoizdat, 1970. 413 p. (in Russian)].
- Бордовский О. К., Иваненко В. Н.* Химия океана. Т. Химия океана. М.: Наука, 1979. 520 с. [*Bordovsky O. K., Ivanenko V. N.* Chemistry of the ocean. T. Chemistry of the ocean. M.: Science, 1979. 520 p. (in Russian)].
- Брайцева О. А., Мелекестев И. В., Пономарева В. В. и др.* Сильные и катастрофические эксплозивные извержения на Камчатке за последние 10 тысяч лет // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. Петропавловск-Камчатский. 2001. С. 235–252. [*Braytseva, O. A., Melekestsev, I. V., Ponomareva, V. V., et al.* Strong and catastrophic explosive eruptions in Kamchatka over the past 10 thousand years // Geodynamics and volcanism of the Kuril-Kamchatka island-arc system. Petropavlovsk-Kamchatsky. 2001. P. 235–252. (in Russian)].
- Виноградов А. П.* Введение в геохимию океана. М.: Наука, 1967. 216 с. [*Vinogradov A. P.* Introduction to ocean geochemistry. M.: Science, 1967. 216 p. (in Russian)].
- Гордеев В. В.* Речной сток в океан и черты его геохимии. М.: Наука, 1983. 152 с. [*Gordeev V. V.* River flow into the ocean and the features of its geochemistry. M.: Science, 1983. 152 p. (in Russian)].
- Захарихина Л. В., Литвиненко Ю. С.* Химический состав почв в ареалах выпадения пеплов активных вулканов Камчатки // Почвоведение. 2016. № 3. С. 333–343. [*Zakharikhina L. V., Litvinenko Yu. S.* Chemical Composition of Soils in the Areas of Volcanic Ashfalls around Active Volcanoes in Kamchatka // Eurasian Soil Science. 2016. V. 49. № 3. P. 305–314]. <https://doi.org/10.7868/S0032180X16030126>.
- Карта полезных ископаемых Камчатской области, масштаб: 1:500000. Камчатприродресурс. 1999 г. Редакторы: Литвинов А.Ф., Марковский Б.А., Патока М.Г. [Map of minerals of the Kamchatka region, scale: 1: 500000. Kamchatpriodresurs. 1999. Editors: Litvinov A.F., Markovskiy B.A., Patoka M.G. (in Russian)].
- Литвиненко Ю. С., Захарихина Л. В.* Почвенные провинции Камчатки и их геохимическая характеристика // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2008. № 1. Вып. 11. С. 98–112. [*Litvinenko, Yu. S.,*

- Zakharikhina, L.V.* Soil provinces of Kamchatka and their geochemical characteristics // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2008. № 1(11). P. 98–112 (in Russian)].
- Литвиненко Ю.С., Захарихина Л.В.* Редкоземельные элементы в снежном покрове Камчатки. Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: материалы Второй Всероссийской конференции с международным участием. Владивосток: Изд-во Дальнаука, 2015а. С. 286–289. [*Litvinenko, Yu.S., Zakharikhina, L.V.* Rare-earth elements in the snow cover of Kamchatka. Geological evolution of the interaction of water with rocks: materials of the Second All-Russian Conference with international participation. Vladivostok: Dalnauka Publishing House, 2015а. P. 286–289 (in Russian)].
- Литвиненко Ю.С., Захарихина Л.В.* Динамика эколого-геохимических изменений природных вод и почв на разных этапах освоения Шанучского медно-никелевого месторождения (Камчатка) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2015б. № 3. Вып. 27. С. 80–91. [*Litvinenko, Yu.S., Zakharikhina, L.V.* Dynamics of ecological and geochemical changes in natural waters and soils at different stages of the development of the Shanuchsky copper-nickel deposit (Kamchatka) // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2015b. № 3(27). P. 80–91 (in Russian)].
- Перельман А.И.* Геохимия ландшафта. М.: Высшая школа, 1975. С. 17–19. [*Perelman A.I.* Geochemistry of the landscape. М.: Higher School, 1975. P. 17–19. (in Russian)].
- Сает Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П. и др.* Геохимия окружающей среды. М.: Недра? 1990. 335 с. [*Saet Yu.E., Revich B.A., Yanin E.P. et al.* Geochemistry of the environment. М.: Nedra. 1990? 335 p. (in Russian)].
- Соловов А.П., Архипов А.Я., Бугров В.А. и др.* Справочник по геохимическим поискам полезных ископаемых. М.: Недра, 1990. 335 с. [*Solovov A.P., Arkhipov A.Y., Bugrov V.A. and others.* Handbook of geochemical prospecting of minerals. М.: Nedra, 1990. 335 p. (in Russian)].
- Селянгин О.Б.* Контаминация магмы, особенности петрогенезиса и распределение рудного вещества в породах никеленосной формации Срединно-Камчатского массива (часть первая) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2018. № 2. Вып. 38. С. 22–33. [*Selyangin O.B.* Magma contamination, peculiarities of petrogenesis and distribution of ore matter in the rocks of the nickeliferous formation of the Mid-Kamchatka massif (part one) // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2018. № 2(38). P. 22–33 (in Russian)]. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2018-2-38-22-33>.
- Трухин Ю.П., Степанов В.А., Сидоров М.Д.* Камчатская никеленосная провинция // ДАН. 2008. Т. 418. № 6. С. 802–805. [*Trukhin Yu.P., Stepanov V.A., Sidorov M.D.* The Kamchatka nickel-bearing province // Doklady Earth Sciences. 2008. V. 419. № 1. P. 214–216]. <https://doi.org/10.1134/S1028334X08020050>.
- Шоба С.А., Захарихина Л.В.* О динамике почвообразования в условиях активного вулканизма // Вестник МГУ. Сер. 17: почвоведение. № 4. 2003. С. 55–62. [*Shoba S.A., Zakharikhina L.V.* On the dynamics of soil formation under conditions of active volcanism // Bulletin of Moscow State University. Ser. 17: soil science. № 4. 2003. P. 55–62 (in Russian)].
- Bursik K.M., Melekestsev I.V., Braitseva O.A.* Most recent deposits of Ksudach volcano, Kamchatka, Russia // Geophysical Research Letters. 1993. V. 20. № 17. P. 1815–1818.

ОСОБЕННОСТИ ГЕОХИМИИ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ
**GEOCHEMICAL FEATURES OF THE BOTTOM SEDIMENTS IN
THE RIVER NETWORK OF THE KAMCHATKA PENINSULA**

L.V. Zakharikhina¹, Yu.S. Litvinenko²

¹*Geotechnological Research Center, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683002;
e-mail: zlv63@yandex.ru*

²*EcoGeoLit Ltd., Moscow, 119330*

The authors estimated the composition and regularities of the spatial distribution of trace elements in the bottom sediments of the river network in different Kamchatka zones. For the first time we revealed that the poorest chemical composition of sediments, which closely correlates with the composition of soils and young volcanic ashes, is typical for the areas of active volcanic activity. Ca and Mg elements as well as 11 rare earth elements (Yb, Lu, Tm, Er, Dy, Ho, Gd, Y, Sm, Eu, Pr) in the priority series give evidence for the relation between the bottom sediments in the region and recent volcanic activity. In Central Kamchatka, where gold-silver ore objects are widespread, a relatively richer composition of bottom sediments has been revealed; typical companion elements of the mineralization, Sb, As, Bi, and Pb, take the lead in the priority geochemical series. On the western coast of the peninsula, where the Kamchatka Nickel-bearing province is developed, the priority elements for bottom sediments include Ni (exceeding the average content in Kamchatka by 1.8 times) and REE: La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, which accompany copper-nickel mineralization in Kamchatka.

Keywords: bottom sediments, Kamchatka, volcanism.