

УДК 631.445+504.05
<http://doi.org/10.18799/24131830/2026/5/5069>
Шифр специальности ВАК: 1.6.21, 1.5.19
Научная статья



Оценка содержания тяжелых металлов в почвах и донных отложениях юго-восточной части полуострова Камчатка

Е.А. Жарикова^{1,2}✉, В.А. Семаль^{1,2}, О.В. Нестерова¹

¹ Дальневосточный федеральный университет, Российская Федерация, г. Владивосток

² Федеральный научный центр Биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии Дальневосточного отделения Российской академии наук, Российская Федерация, г. Владивосток

✉ ejarikova@mail.ru

Аннотация. Актуальность. Обусловлена необходимостью комплексного исследования состава и экологического состояния почв и донных отложений уникального района с высоким биоресурсным и туристическим потенциалом. **Цель.** Оценка экологического состояния почв различного землепользования и донных отложений прибрежной территории юго-восточной части полуострова Камчатка в отношении тяжелых металлов. **Объекты.** Целинные, агрогенные, нарушенные почвы юго-восточной части полуострова Камчатка и донные отложения Авачинского залива. **Методы.** Кислоторастворимые формы тяжелых металлов определяли методом атомно-абсорбционного анализа на атомно-абсорбционном пламенно-эмиссионном спектрофотометре AA-6800 F Shimadzu. Физико-химические свойства почв – по стандартным методикам. **Результаты.** С увеличением антропогенной нагрузки в легких по гранулометрическому составу вулканических почвах снижается кислотность и содержание органического вещества. Содержание большинства тяжелых металлов в почвах находится в пределах официальных норм, имеются единичные случаи незначительного превышения ПДК/ОДК по меди, цинку и кадмию. В донных отложениях превышения ПДК/ОДК наблюдаются по меди, цинку и кадмию в большей части проб. Почвы юго-восточной части полуострова Камчатка в абсолютном большинстве случаев характеризуются допустимым (по Zc) или слабым (по NPI) уровнем загрязнения и незначительной величиной потенциального экологического риска PERI. Загрязнение большей части донных отложений оценивается как среднее и сильное, величина PERI в них варьирует от незначительного до очень высокого. Суммарный экологический риск для бентосных организмов m-PEL-Q находится в диапазоне от средне-низкого до высокого. Высокое содержание тяжелых металлов в донных отложениях с большой степенью вероятности является следствием естественной геохимической аномалии.

Ключевые слова: тяжелые металлы, загрязнение почв, потенциальный экологический риск, геохимическая аномалия, донные отложения, полуостров Камчатка

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FZNS-2024-0037 «Комплексный экологический мониторинг прибрежных морских и наземных экосистем Камчатки» и государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 124012400285-7).

Для цитирования: Жарикова Е.А., Семаль В.А., Нестерова О.В. Оценка содержания тяжелых металлов в почвах и донных отложениях юго-восточной части полуострова Камчатка. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, 2026, Т. 337, № 5, С. 83–93. <http://doi.org/10.18799/24131830/2026/5/5069>

Конфликт интересов: отсутствует.

UDC 631.445+504.05
<http://doi.org/10.18799/24131830/2026/5/5069>
Scientific paper

Assessment of heavy metal content in soils and bottom sediments of the south-eastern part of the Kamchatka Peninsula

E.A. Zharikova^{1,2✉}, V.A. Semal^{1,2}, O.V. Nesterova¹

¹ Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

² Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation

✉ ejarikova@mail.ru

Abstract. Relevance. The need for a comprehensive study of the composition and ecological state of soils and bottom sediments of a unique area with high bioresource and tourist potential. **Aim.** To assess the ecological state of soils of different land use and bottom sediments of the coastal territory of the south-eastern part of the Kamchatka Peninsula with respect to heavy metals. **Objects.** Virgin, agrogenic, disturbed soils of the south-eastern part of the Kamchatka Peninsula and bottom sediments of the Avacha Bay. **Methods.** Acid-soluble forms of heavy metals were determined by atomic-absorption analysis on atomic-absorption flame-emission spectrophotometer AA-6800 F Shimadzu. Physicochemical properties of soils were determined according to standard methods. **Results and conclusions.** With the increase of anthropogenic pressure in volcanic soils of light texture, acidity and organic matter content decreases. The content of most heavy metals in soils is within the official norms, there are single cases of insignificant exceedances of copper, zinc and cadmium. In bottom sediments exceedances are observed for copper, zinc and cadmium in most of the samples. Soils of the south-eastern part of Kamchatka peninsula in absolute majority of cases are characterized by permissible (by Zc) or weak (by NPI) level of pollution and insignificant value of potential ecological PERI risk. Pollution of most of the bottom sediments is assessed as medium to strong, with PERI values ranging from negligible to very high. The total ecological risk for benthic organisms m-PEL-Q ranges from medium-low to high. The high content of heavy metals in bottom sediments is very most likely a consequence of a natural geochemical anomaly.

Keywords: heavy metals, soil pollution, potential ecological risk, geochemical anomaly, bottom sediments, Kamchatka Peninsula

Acknowledgements: The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project no. FZNS-2024-0037 “Integrated environmental monitoring of coastal marine and terrestrial ecosystems of Kamchatka” and the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic no. 124012400285-7).

For citation: Zharikova E.A., Semal V.A., Nesterova O.V. Assessment of heavy metal content in soils and bottom sediments of the south-eastern part of the Kamchatka Peninsula. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2026, vol. 337, no. 5, pp. 83–93. <http://doi.org/10.18799/24131830/2026/5/5069>

Conflict of interest: none.

Введение

Объективным критерием экологического состояния территории при наличии антропогенного воздействия служит химический состав почв и донных отложений прибрежных зон. Эти компоненты окружающей среды способны как депонировать и длительно удерживать различные поллютанты, так и являться источником вторичного загрязнения, негативно воздействуя на здоровье населения и состояние биологических объектов [1–3].

Морские донные отложения – это осадки минерального и органического происхождения, покрывающие дно океанов и морей, одной из характерных особенностей которых является относительное

постоянство состава на обширной территории в относительно стабильных (по сравнению с континентом) условиях [4–6]. На состав донных отложений непосредственное влияние оказывает состав материала от эрозии морских берегов и поверхностных слоев почв, состав твердого стока рек и ручьев, а также продукты вулканических извержений. Почвы при этом являются базовым компонентом в массообмене между природными сопредельными средами (воздушной и водной) [7]. По составу почв и донных отложений можно судить о геологических и экологических процессах, происходящих в экосистемах, его изучение актуально для выявления изменений климата, состояния и интен-

сивности гидрологических, биологических процессов, а также исторических событий. Но комплексные исследования состава и экологического состояния почв и донных отложений прибрежных территорий Дальневосточного региона единичны [8].

Камчатский полуостров является особым регионом России, в последние годы в нем отмечен значительный рост туристического сектора, особенно в юго-восточной части. Прибрежная территория Авачинской губы представляет собой уникальную территорию, где на относительно небольшой площади представлены элементы различных природных зон, при этом она испытывает значительный антропогенный прессинг, поскольку на этой территории наблюдается наибольшая плотность населения и размещены предприятия судоремонта, рыбного, сельского и лесного хозяйства [9]. Одной из причин уязвимости экосистем этого района является то, что в почвенном покрове территории доминируют легкие по гранулометрическому составу вулканические почвы, обладающие малой сорбционной емкостью, которые не способны прочно удерживать загрязнители [10]. При этом в регионе отмечены негативные процессы, связанные с техногенным воздействием в виде поступления на поверхность почвы загрязненных атмосферных осадков, аэрозольных выпадений, бытовых и производственных отходов населенных пунктов, захлыванием, нецелевым использованием земель [11, 12]. Кроме того, пепловые выбросы в атмосферу Авачинско-Корякской группы действующих вулканов содержат тяжелые металлы, которые могут переноситься на значительные расстояния воздушными потоками и в итоге депонироваться в почве [13, 14]. Также нельзя не учитывать интенсивный вынос реками и аккумуляцию в донных отложениях прибрежной зоны пирокластического материала при размывании гидротермально-измененных горных пород вулканов Авачинской и Жупановской вулканических групп [15].

Проблемы экологической безопасности юго-восточной части полуострова Камчатка особенно актуальны в связи с тем, что в этом регионе Российской Федерации идет интенсивная добыча водных биологических ресурсов – важной составляющей рациона населения, и активно развивается туризм, в том числе и популярный дайвинг.

Целью работы является оценка экологического состояния почв различного землепользования и донных отложений прибрежной территории юго-восточной части полуострова Камчатка в отношении тяжелых металлов.

Объекты и методика исследования

Почвы региона формируются при промывном водном режиме в условиях холодного гумидного климата, их минеральную основу составляют пре-

имущественно вулканические пеплы [16]. Исследованы почвы разной степени антропогенной нарушенности, в том числе и литостраты – техногенные поверхностные образования, представляющие собой насыпные минеральные грунты (отвалы строительных предприятий, грунтовые насыпи и т. д., образующиеся при обустройстве территории) [17]. Образцы пахотных и целинных почв (охристых, светло-охристых, аллювиальных гумусовых, аллювиальных торфяно-глеевых) были отобраны в долинах рек Авачи и Паратунки, нарушенные почвы (и литостраты) – в г. Петропавловске-Камчатском и прибрежной части Авачинской бухты, донные отложения – в различных бухтах Авачинского залива (рис. 1).

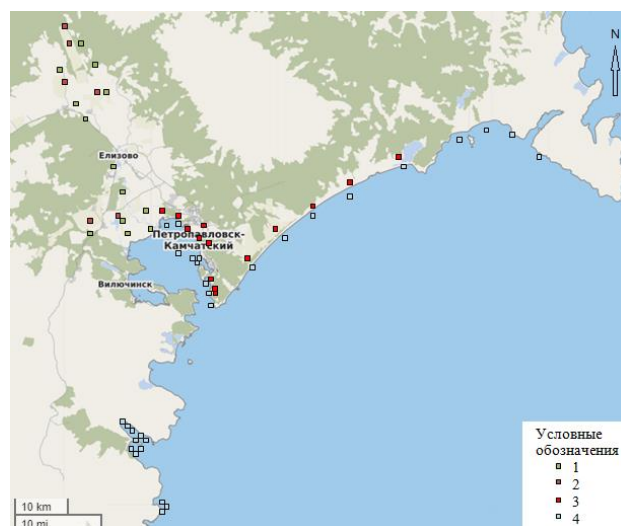


Рис. 1. Местоположение отбора проб. Условные обозначения: 1 – целинные почвы, 2 – пахотные почвы, 3 – нарушенные почвы, 4 – донные отложения

Fig. 1. Sampling location. Legend: 1 – native soils, 2 – arable soils, 3 – disturbed soils, 4 – bottom sediments

Образцы почв отбирали из слоя 0–10 см пластмассовым шпателем, образцы донных отложений (песчаный и песчано-алевритовый неуплотненный осадок, содержащий песчаный и алевритовый материал в количестве от 40 до 60 % каждого) отбирали пробоотборником из верхних горизонтов отложений (0–15 см) с глубин от 1 до 20 м, где максимально аккумулируются загрязнители. Пробы высушивались до воздушно-сухого состояния, диспергировались и перемешивались [18]. Кислоторастворимые формы тяжелых металлов (ТМ) определяли методом атомно-абсорбционного анализа на атомно-абсорбционном пламенно-эмиссионном спектрофотометре AA-6800 F Shimadzu в пламени ацетилен–воздух [19]. В образцах по стандартным методикам определяли также физико-химические

свойства, влияющие на способность почв и донных отложений сорбировать поллютанты: содержание органического углерода по методу Тюрина, pH солевой суспензии – потенциметрически на pH-метре FE20 Kit FiveEasy (Mettler Toledo, Швейцария), гранулометрический состав ситовым и седиментационным методами [20]. Все химико-аналитические работы выполнены на кафедре почвоведения Дальневосточного федерального университета и в Центре коллективного пользования «Биотехнология и генетическая инженерия» ФНЦ Биоразнообразия ДВО РАН.

При характеристике экологического состояния почв и донных отложений применяли геоэкологические показатели, широко используемые в России (Zc) [21] и в мире (PI, NPI, Igeo, PERI, m-PEL-Q) (табл. 1) [22–36]. В качестве фоновых значений при расчетах были использованы данные о содержании V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Pb в почвах юго-восточной части полуострова Камчатка [13], для Cd – кларк в почвах мира [37]. При расчете коэффициента аккумуляции использовались сведения о содержании тяжелых металлов в вулканических породах [38]. Статистический анализ данных проведен с использованием программного комплекса Statistica.

Таблица 1. Геохимические показатели для оценки степени химического загрязнения почв и донных отложений

Table 1. Geochemical indicators for assessing the degree of chemical contamination of soils and sediments

Индекс Index	Формула Formula	Источ- ник Source
Суммарный показатель загрязнения (Zc) Total pollution index	$Zc = \sum(K_{ci} + \dots + K_{cn}) - (n-1)$	[21]
Индекс геоаккумуляции (Igeo) Geoaccumulation Index	$Igeo = \log_2(C_i/1,5GB)$	[39]
Индекс загрязнения (NPI) Nemerow pollution index	$NPI = \sqrt{0,5(PI_{1\max}^2 + PI_{1ave}^2)}$	[40]
Коэффициент концентрации PI Coefficient of concentration	$PI = C_i/GB$	[40]
Потенциальный экологический риск PERI Potential environmental risk	$PERI = \sum PI_i * T_i$	[41]
Оценка воздействия на бентос m-PEL-Q Benthos impact assessment	$m-PEL-Q = [\sum(C_i/PEL)]/n$	[42]

Результаты исследования и их обсуждение

Содержание органического углерода в почвах исследуемой территории колеблется от 0,1 до 9,34 %, наименьшее среднее содержание выявлено в нарушенных почвах и донных отложениях. В пахотных и целинных почвах оно близко, но в по-

следних пределы колебаний намного шире, а наибольшее варьирование отмечено в нарушенных почвах (табл. 2). Полученные данные полностью согласуются с выводом о снижении содержания органического углерода в почвах селитебно-промышленных населенных пунктов [43].

Величина обменной кислотности (pH_{KCl}) характеризует большинство целинных почвы как среднекислые, пахотные – как слабокислые, нарушенные почвы имеют преимущественно нейтральную кислотность, а донные отложения – слабощелочную. Подобная среда является следствием техногенной нагрузки в результате попадания в антропогенные почвы ионов щелочных и щелочноземельных металлов из обломков щебня, строительного и бытового мусора, которые в качестве включений в значительном количестве содержатся в городских почвах и на побережье [44]. По гранулометрическому составу пахотные и целинные почвы являются супесями и легкими суглинками, донные отложения, антропогенно-преобразованные (нарушенные почвы) и литостраты – преимущественно песками.

Химико-экологическая оценка содержания тяжелых металлов в целинных и пахотных почвах показала, что почти все тяжелые металлы в кислоторастворимой форме находятся в пределах официальных норм, имеются единичные случаи незначительного превышения ориентировочно-допустимых концентраций (ОДК), по меди, цинку и кадмию, что, возможно, связано с природными особенностями территории [13] (табл. 3). И хотя в целинных почвах размах варьирования содержания тяжелых металлов шире, чем в пахотных, величина среднего содержания ТМ выше в последних. Возможно, это связано с широким применением фосфорных удобрений, содержащих значительные примеси тяжелых металлов [45]. В трех нарушенных почвах выявлено значительное превышение ОДК содержания цинка, вероятно, как результат техногенного воздействия, что уже было отмечено ранее [14]. Иная картина складывается при рассмотрении состава донных отложений. Содержание хрома, кобальта и свинца в них находится в пределах нормы. Выявлено незначительное превышение ОДК по никелю в двух случаях. Множественные превышения ОДК наблюдаются по меди, цинку и кадмию.

Выборка считается сильно неоднородной при значениях коэффициента вариации выше 70 %, и такое распределение элементов может быть вызвано как геохимической неоднородностью вулканических почв, так и антропогенным привнесом тяжелых металлов [46]. На исследованной территории выборка неоднородна по отношению к хрому, никелю, цинку и свинцу в целинных почвах и по отношению к цинку, свинцу и кадмию в нарушенных почвах и донных отложениях.

Таблица 2. Содержание органического углерода и кислотность почв и донных отложений

Table 2. Organic matter content and acidity of soils and sediments

Объект/Object	M±m	V, %	Lim	M±m	V, %	Lim
	C _{орг} /SOM, %			pH _{KCl}		
Целинные почвы/Native soils (n=16)	3,6±0,077	82	0,16–9,34	4,8±0,11	9	4,2–5,8
Пахотные почвы/Arable soils (n=6)	3,6±0,27	19	3,1–4,9	5,1±0,16	8	4,6–5,6
Нарушенные почвы/Disturbed soils (n=10)	0,7±0,50	209	0,1–4,2	6,6±0,08	5	6,0–6,9
Донные отложения/Bottom sediments (n=11)	0,8±0,14	106	0,1–3,4	7,5±0,11	8	6,0–8,2

Примечание: здесь и в табл. 3 Lim – пределы колебаний, M – среднее содержание, m – ошибка среднего, n – число проб, V – коэффициент вариации, прочерк – нет данных.

Note: Lim – variation limits, M – average content, m – mean error, n – number of samples, V – coefficient of variation, dash – data are not available.

Таблица 3. Тяжелые металлы в почвах и донных отложениях юго-восточной части полуострова Камчатка (мг/кг)

Table 3. Heavy metal concentrations in soils and bottom sediments of the southeastern part of Kamchatka Peninsula (mg/kg)

Элемент Chemical element	M±m	V, %	Lim	M±m	V, %	Lim	Кларк в вулканиче- ских породах Clark in the volcanic rocks [38]	ОДК песчаные и супес- чаные почвы APC sandy and sandy loam soils [21]
	Целинные почвы Native soils (n=16)			Пахотные почвы Arable soils (n=6)				
Cr	29±8	108	3–80	107±9,4	22	87–147	85	–
Co	22±1	7	20–24	20±1,9	23	11–23	24	–
Ni	6±1	96	0,8–22	12±0,5	10	11–14	58	20,0
Cu	30±4	49	8,8–63	50±6,7	33	33–76	57	33,0
Zn	35±7	84	3,4–90	76±11,4	37	44–111	79	55,0
Pb	10±2	87	1–30	15±2,3	39	10–22	15	32,0
Cd	0,5±0,09	64	0,10–1,00	–	–	–	0,31	0,5
Элемент Chemical element	Нарушенные почвы Disturbed soils (n=14)			Донные отложения Bottom sediments (n=28)			Кларк в почвах Clark in the soils [37]	ОДК кислые (суглини- стые почвы) pH KCl<5,5 APC acid (loam) soils [21]
Cr	2±0	18	2–3	46±6,7	68	1–110		
Co	–	–	–	3±0,7	57	1–6	11,3	–
Ni	–	–	–	12±1,3	53	2–16	29	40,0
Cu	–	–	–	39±5,1	61	5–102	38,9	66,0
Zn	223±157	223	9–1626	36±6,3	94	4–138	70	110,0
Pb	7±2	113	1–30	7±1,2	92	1–25	27	65,0
Cd	0,2±0,080	132	0,1–1,2	1,3±0,29	126	0–2	0,41	1,0

Note: APC – approximate permissible concentrations.

Величина суммарного показателя (Zc) во всех образцах почв и литостратов не превышает 16, что указывает на допустимый уровень загрязнения. В донных отложениях показатель Zc равен 16 в единственном случае, но по содержанию элементов первого класса опасности (кадмия) категория загрязнения «опасная» выявлена в половине отобранных проб.

Индекс загрязнения PI (Single Pollution Index) широко применяется для выявления наличия загрязнения отдельными элементами, полученные его средние значения для территории юго-восточной части полуострова Камчатка указывают на слабое загрязнение целинных почв никелем и кадмием, загрязнение хромом, медью и цинком отсутствует (рис. 2). В единичных образцах выявлено загрязнение никелем, свинцом и кадмием (варьирует от среднего до сильного). Средние значения PI характеризуют пахотные почвы как чистые в отношении хрома, меди и цинка, и как слабозагрязненные в отношении кобальта, никеля и свин-

ца. Максимальные значения PI указывают на слабое загрязнение медью, цинком и свинцом и среднее – кобальтом и никелем в единичных образцах. В антропогенно-нарушенных почвах средние значения PI свидетельствуют о средней степени загрязнения цинком (максимальные – об очень сильном в одном образце почв, на пляже в окрестностях г. Петропавловска-Камчатского). Единичные наибольшие значения PI указывают на среднее загрязнение свинцом и кадмием. В донных отложениях средние значения PI указывают на слабое загрязнение никелем и сильное – кадмием. Максимальные значения PI в отдельных образцах говорят о наличии слабого загрязнения цинком, среднего – никелем и свинцом и очень сильного – кадмием.

Индекс геоаккумуляции Igeo (Geoaccumulation Index) служит геохимическим критерием для выявления даже самого незначительного антропогенного воздействия (загрязнения). Его средние значения позволяют утверждать, что степень загрязнения всех исследованных объектов варьирует от слабой

до средней в отношении тяжелых металлов (кроме хрома, в отношении которого целинные и нарушенные почвы являются чистыми). Максимальные значения I_{geo} свидетельствуют о сильном загрязнении цинком одного образца нарушенных почв и о средней и сильной степени загрязнении кадмием в единичных образцах донных отложений.

Средние значения индекса загрязнения Nemerow (NPI) характеризуют почвы всех категорий как слабозагрязненные, в двух образцах нарушенных почв с набережной г. Петропавловска-Камчатского и пляжа в его окрестностях выявлено сильное загрязнение (рис. 3). В донных отложениях средние значения NPI преимущественно указывают на среднее загрязнение, но 20 % донных отложений загрязнены в сильной степени. При этом 25 % целинных и 75 % нарушенных почв и 40 % донных отложений относятся к чистым.

Величины потенциального экологического риска PERI характеризуют его как незначительный в целинных (11–88), пахотных (30–38) и нарушенных почвах (7– 23), за исключением почвы, расположенной в районе набережной г. Петропавловска-Камчатского (риск средний). В донных отложениях в одной пробе выявлен очень высокий уровень потенциального экологического риска, в двух – высокий и в 8 пробах – средний.

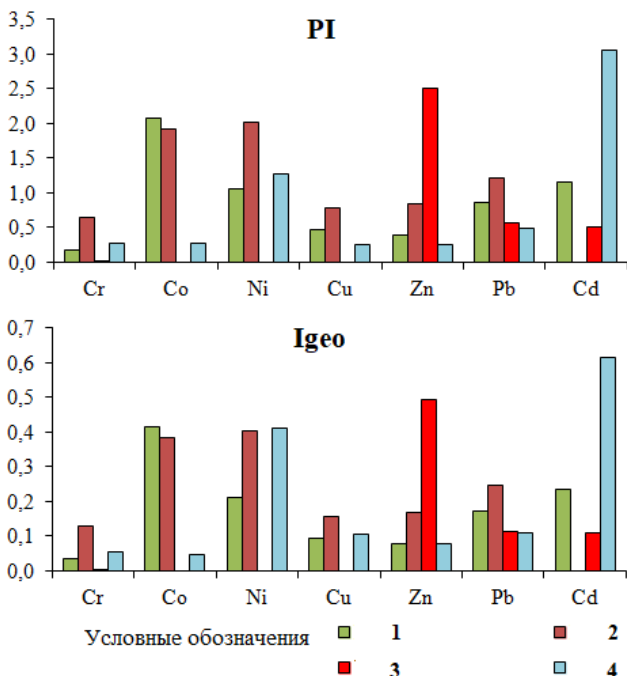


Рис. 2. Средние значения PI и I_{geo} в почвах и донных отложениях. Условные обозначения: 1 – целинные почвы, 2 – пахотные почвы, 3 – нарушенные почвы, 4 – донные отложения

Fig. 2. Average PI and I_{geo} values in soils and sediments. Legend: 1 – native soils, 2 – arable soils, 3 – disturbed soils, 4 – bottom sediments

По суммарному экологическому риску для бентосных организмов, определяемому величиной коэффициента $m\text{-PEL-Q}$, донные отложения Авачинского залива слабо дифференцированы, в подавляющем большинстве случаев экологический риск оценивается как средне-низкий, в трех случаях – как средне-высокий, в двух – как высокий. Полученные данные полностью согласуются со сведениями о снижении численности и разнообразия бентосных организмов в Авачинской губе [47].

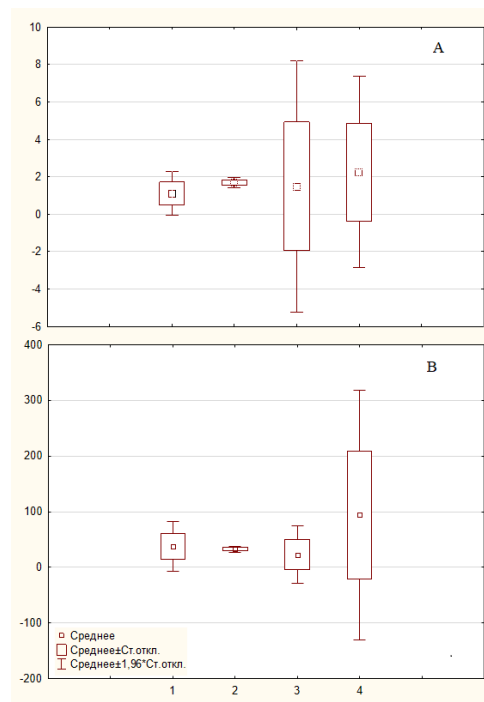


Рис. 3. Диаграмма размаха значений NPI (A) и PERI (B). 1 – целинные почвы, 2 – пахотные почвы, 3 – нарушенные почвы, 4 – донные отложения

Fig. 3. Range diagram of NPI (A) and PERI (B) values. 1 – native soils, 2 – arable soils, 3 – disturbed soils, 4 – bottom sediments

Все пробы донных отложений с высоким уровнем потенциального экологического риска отобраны в бухтах Авачинская и Вилючинская, где накапливаются и сохраняются в течение длительного периода времени элементы с водосборных площадей рек Авачи и Вилючи, и других, протекающих по территории Южно-Камчатского горнорудного района, где выявлены высокие концентрации тяжелых металлов. Так, в месторождении Родниковое (с рудопроявлением Вилючинское) содержание кадмия в сфалерите (втором по распространению рудном минерале) может достигать 0,5 % [48]. В Мутновском золото-серебро-полиметаллическом месторождении среднее содержание свинца составляет 0,99 %, цинка – 1,13 %, кадмия – 290 мг/кг [49, 50]. Кроме того, юго-

восточная часть полуострова Камчатка находится в зоне активного вулканизма, при этом в продуктах извержения Авачинского и Мутновского вулканов содержание кадмия достигает 2821 мкг/г в сублиматах [51], поэтому высокое содержание тяжелых металлов в донных отложениях скорее является результатом естественного накопления (проявление геохимической аномалии). Но нельзя исключать также и воздействие техногенных факторов, поскольку на берегах Авачинского залива расположены города Петропавловск-Камчатский и Вилючинск. Кроме того, все образцы донных отложений с наибольшим содержанием поллютантов характеризуются более тяжелым гранулометрическим составом (алевриты и мелкоалевритовые илы) и, соответственно, большей сорбционной способностью.

Заключение

В образцах почв и литостратов юго-восточной части полуострова Камчатка согласно значениям суммарного показателя Zc уровень загрязнения оценивается как допустимый, в донных отложениях по содержанию элементов первого класса опасности (кадмия) опасная категория загрязнения выявлена в половине отобранных проб. Превышение ПДК/ОДК по меди, цинку и кадмию выявлено в единичных образцах почв и в большинстве образцов донных отложений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Brevik E.C., Sauer T.J. The past, present, and future of soils and human health studies. *Soil*, 2015, Vol. 1, P. 35–46. DOI: 10.5194/soil-1-35-2015.
2. Ушакова Е.С., Белкин П.А. Современные технологии ремедиации загрязненных тяжелыми металлами донных осадков. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, 2024, Т. 335, № 11, С. 54–68. DOI: 10.18799/24131830/2024/11/4521.
3. Hou D., Jia X., Wang L., McGrath S.P., Zhu Y.G., Hu Q., Zhao F.J., Bank M.S., O'Connor D., Nriagu J. Global soil pollution by toxic metals threatens agriculture and human health. *Science*, 2025, Vol. 388, P. 316–321. DOI:10.1126/science.adr5214
4. *Географический энциклопедический словарь. Понятия и термины.* Под ред. Э.Б. Алаева, В.М. Котлякова, В.С. Преображенского, А.Ф. Трешникова. М.: Советская энциклопедия, 1988. 456 с.
5. Михайлов В.Н., Добровольский А.Д., Добролюбов С.А. *Гидрология*. М.: Высшая школа, 2007. 463 с.
6. Ежова А.В., Тен Т.Г. *Литология нефтегазоносных толщ*. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. 122 с.
7. Куксина Л.В. Изменчивость характеристик стока взвешенных наносов рек Камчатского края. *Известия Российской академии наук. Серия географическая*, 2019, № 1, С. 52–61. DOI: 10.31857/s2587-55662019152-61.
8. Захарихина Л.В., Литвиненко Ю.С. Особенности геохимии донных отложений речной сети полуострова Камчатка. *Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле*, 2018, № 4 (40), С. 23–37. DOI: 10.31431/1816-5524-2018-4-40-23-37.
9. Бочарников В.Н., Кириченко В.Е., Герасимов Ю.Н. Актуальные задачи сохранения крупных целостных горно-лесных геозосистем Камчатского края в контексте практического использования геоконцепта дикой природы. *ИнтерКарто. ИнтерГИС*, 2019, Т. 25, № 2, С. 309–320. DOI: 10.35595/2414-9179-2019-2-25-309-320.
10. Голодная О.М., Жарикова Е.А. Особенности гранулометрического состава и плотности освоенных аллювиальных почв Дальнего Востока. *Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.П. Филипова*, 2016, вып. 42, № 1, С. 19–26.
11. Ключкова Н.Г., Климова А.В., Очеретяна С.О., Кусиди А.Э., Касперович Е.В. Воздействие антропогенного загрязнения на состояние макробентоса в бухте Раковая (Авачинская губа, юго-восточная Камчатка). *Вестник Камчатского государственного технического университета*, 2016, № 35, С. 53–64. DOI: 10.17217/2079-0333-2016-35-53-64.
12. Ermolin M.S., Fedotov P.S., Malik N.A., Karandashev V.K. Nanoparticles of volcanic ash as a carrier for toxic elements on the global scale. *Chemosphere*, 2018, Vol. 200, P. 16–22. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.02.089.
13. Захарихина Л.В., Литвиненко Ю.С. Химический состав почв в ареалах выпадения пеплов активных вулканов Камчатки. *Почвоведение*, 2016, № 3, С. 333–343. DOI: 10.7868/S0032180X16030126.
14. Авдощенко В.Г., Климова А.В. Оценка загрязнения тяжелыми металлами почв города Петропавловска-Камчатского (Камчатский край). *Вестник Камчатского государственного технического университета*, 2022, № 61, С. 65–81. DOI: 10.17217/2079-0333-2022-61-65-81.

Максимальные значения индексов загрязнения PI и геоаккумуляции Igeo свидетельствуют о том, что в отношении тяжелых металлов степень загрязнения в почвах и донных отложениях варьирует в широких пределах – от полного отсутствия до сильного (в отдельных образцах). Почвы загрязнены преимущественно цинком, кобальтом и никелем, донные отложения – никелем и кадмием.

Почвы юго-восточной части полуострова Камчатки в абсолютном большинстве случаев характеризуются слабым уровнем загрязнения по NPI и незначительной величиной потенциального экологического риска PERI. В большинстве донных отложений выявлено среднее и сильное загрязнение по NPI. Величина потенциального экологического риска варьирует от незначительного до очень высокого, суммарный экологический риск для бентосных организмов m-PEL-Q колеблется от средне-низкого до высокого.

Применение различных геохимических показателей выявило неоднозначную картину в оценке экологического состояния почв и донных отложений исследуемой территории.

Значительное содержание тяжелых металлов в донных отложениях с высокой степенью вероятности является результатом естественной геохимической аномалии.

15. Чуян Г.Н., Быкасов В.Е. Особенности осадконакопления в Авачинском заливе. *Сохранение биоразнообразия Камчатки и прилегающих морей: Материалы II науч. конф.* Петропавловск-Камчатский, 9–10 апреля 2001. С. 194–195.
16. Соколов И.А. *Вулканизм и почвообразование*. М.: Наука, 1973. 224 с.
17. Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. *Классификация и диагностика почв России*. Смоленск: Изд-во Ойкумена, 2004. 342 с.
18. ГОСТ 17.4.4.02.2017 *Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа*. М.: Стандартинформ, 2018. 21 с.
19. ПНД Ф 16.2.2:2.3.71-2011 *Количественный химический анализ почв. Методика измерений массовых долей металлов в осадках сточных вод, донных отложениях, образцах растительного происхождения спектральными методами*. М., 2011. 39 с.
20. *Агрохимические методы исследования почв*. Под ред. А.В. Соколова. М.: Наука, 1975. 656 с.
21. СанПиН 1.2.3685-21. *Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания*. М., 2021. 1029 с.
22. Жарикова Е.А. Тяжелые металлы в городских почвах: оценка содержания и экологического риска. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, 2021, Т. 332, № 1, С. 164–173. DOI: 10.18799/24131830/2021/1/3009.
23. Жарикова Е.А., Клышевская С.В., Попова А.Д. Особенности химического состава почв и донных отложений долины реки Второй Речки (г. Владивосток, Россия). *Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле*, 2024, Т. 50, С. 48–62. DOI: 10.26516/2073-3402.2024.50.48.
24. Галышева Ю.А., Пелех А.Д., Бойченко Т.В., Нестерова О.В., Яковлева А.Н. Органическое вещество в экосистеме залива Владимира (Японское море): пищевые ресурсы и экологический фактор риска. *Морской биологический журнал*, 2023, Т. 8, № 2, С.18–41. DOI: 10.21072/mbj.2023.08.2.02.
25. Wang J., Yuan J., Hou Q., Yang Z., You Yu., Yu T., Ji J., Dou L., Ha X., Sheng W., Liu X. Distribution of potentially toxic elements in soils and sediments in Pearl River Delta, China: natural versus anthropogenic source discrimination. *Science of The Total Environment*, 2023, Vol. 903, P. 166573. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.166573.
26. Saleem M., Pierce D., Wang Y., Sens D.A., Somji S., Garrett S.H. Heavy metal(oid)s contamination and potential ecological risk assessment in agricultural soils. *Journal of Xenobiotics*, 2024, Vol. 14, P. 634–650. DOI: 10.3390/jox14020037.
27. Kumar S., Pandita S., Setia R. Ameta-analysis of potential ecological risk evaluation of heavy metals in sediments and soils. *Gondwana Research*, 2022, Vol. 103, P. 487–501. DOI: 10.1016/j.gr.2021.10.028.
28. Peng J.Y., Zhang S., Han Y.Y., Bate B., Ke H., Chen Y.M. Soil heavy metal pollution of industrial legacies in China and health risk assessment. *Science of the Total Environment*, 2022, Vol. 816, P. 151632. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.151632.
29. Xianga Q., Yua H., Chub H., Hua M., Xua T., Xuc X., He Z. The potential ecological risk assessment of soil heavy metals using self-organizing map. *Science of the Total Environment*, 2022, Vol. 843, P. 156978. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.156978.
30. Gao J., Gong J., Yang J., Wang Zh., Fu Ya., Tang Sh., Ma Sh. Spatial distribution and ecological risk assessment of soil heavy metals in a typical volcanic area: Influence of parent materials. *Heliyon*, 2023, Vol. 9, № 1, P. e12993. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e12993.
31. Adimalla N., Gao Y., Wang Z., Quan H. Spatial distribution, contamination characteristics and potential ecological risk assessment of trace metals in surface soils of south-central stretch of India. *Water Air and Soil Pollution*, 2024, Vol. 235, P. 522. DOI: 10.1007/s11270-024-07344-6.
32. Candeias C., Ávila P.F., Sequeira C., Manuel A., Rocha F. Potentially toxic elements dynamics in the soil rhizospheric-plant system in the active volcano of Fogo (Cape Verde) and interactions with human health. *Catena*, 2022, Vol. 209 (1), P. 105843. DOI: 10.1016/j.catena.2021.105843.
33. Li Q., Chen M., Zheng X., Chen W. Determination of tungsten's toxicity coefficient for potential ecological risk assessment. *Environmental Research Communications*, 2023, Vol. 5, № 2, P. 025003. DOI 10.1088/2515-7620/acab4e.
34. Cao Y., Wang R., Liu Y., Li Y., Jia L., Yang Q., Zeng X., Li X., Wang Q., Wang R., Riaz L. Improved calculations of heavy metal toxicity coefficients for evaluating potential ecological risk in sediments based on seven major Chinese water systems. *Toxics*, 2023, Vol. 11, 650. DOI: 10.3390/toxics11080650.
35. Podlasek A., Vaverkova M.D., Jakimiuk A., Koda E. Potentially toxic elements (PTEs) and ecological risk at waste disposal sites: an analysis of sanitary landfills. *PLoS ONE*, 2024, Vol. 19 (5), P. e0303272. DOI: 10.1371/journal.pone.0303272.
36. Luo Y., Wang N., Liu Z., Sun Y., Lu N. Characteristics and risk assessment of potentially toxic elements pollution in river water and sediment in typical gold mining areas of Northwest China. *Scientific Reports*, 2024, Vol. 14, P. 12715. DOI: 10.1038/s41598-024-63723-3.
37. Kabata-Pendias A. *Trace elements in soils and plants*. 4th ed. Boca Raton: CRS Press, 2011. 548 p.
38. Григорьев Н.А. *Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры*. Екатеринбург: Уро РАН, 2009. 383 с.
39. Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geo Journal*, 1969, Vol. 2, P. 108–118.
40. Kowalska J.B., Mazurek R., Gasiorek M., Zaleski T. Pollution indices as useful tools for the comprehensive evaluation of the degree of soil contamination. A review. *Environmental Geochemistry and Health*, 2018, Vol. 40, P. 2395–2420. DOI: 10.1007/s10653-018-0106-z.
41. Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach. *Water Research*, 1980, Vol. 14, № 8, P. 975–1001.
42. MacDonald D.D., Ingersoll C.G., Berger T.A. Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2000, № 39, P. 20–31.
43. Водяницкий Ю.Н. Органическое вещество в городских почвах. *Почвоведение*, 2015, № 8, С. 921–931. DOI: 10.7868/S0032180X15080110.

44. Еремченко О.З., Москвина Н.В. Свойства почв и техногенных поверхностных образований в районах многоэтажной застройки г. Пермь. *Почвоведение*, 2005, № 7, С. 782–789.
45. Жарикова Е.А. Влияние агрогенного воздействия на содержание фосфора в почвах Камчатки. *Сохранение биоразнообразия Камчатки и прилегающих морей: материалы XVI междунауч. конф.* Петропавловск-Камчатский, 18–19 ноября 2015. Петропавловск-Камчатский: Камчатпресс, 2015. С. 175–178.
46. Гололобов А.Г. Исследование пространственного распределения микроэлементов в почвах методом многомерного статистического анализа (на примере территории Далдынского кимберлитового поля, Северо-Западная Якутия). *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, 2023, Т. 334, № 3, С. 89–103. DOI: 10.18799/24131830/2023/3/3875.
47. Чуян Г.Н., Быкасов В.Е. Антропогенное загрязнение лагун Камчатки. *Труды Камчатского филиала Тихоокеанского института географии ДВО РАН*. Петропавловск-Камчатский: Камчатский печатный двор, 2004. Вып. V, С. 411–420.
48. *Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России*. Под ред. А.И. Ханчука. Владивосток: Дальнаука, 2006. Кн. 1, 572 с.
49. Shishkanova K.O., Okrugin V.M., Filosofova T.M. Features of the mineralogy of the ores of the southern flank of the Mutnovskoe gold–silver–polymetallic deposit (Southern Kamchatka). *Geology of ore deposit*, 2024, Vol. 66, P. 142–158. DOI: 10.1134/S1075701524010057.
50. Швейгерт П.Е., Жегунов П.С., Москалева С.В. Рудная минерализация северного фланга Мутновского золото-серебро-полиметаллического месторождения (Камчатка). *Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле*, 2024, вып. 61, № 1, С. 72–82. DOI: 10.31431/1816-5524-2024-1-61-72-82.
51. Округин В.М., Малик Н.А., Зобенько О.А., Кудаева Ш.С., Москалева С.В., Плутахина Е.Ю., Скильская Е.Д., Шишканова К.О., Яблокова Д.А. Активные вулканы и редкометальная минерализация Камчатского края. *Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы XX регион. научн. конф.* Петропавловск-Камчатский 30–31 марта 2017. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2017. С. 189–191.

Информация об авторах

Елена Анатольевна Жарикова, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Федеральный научный центр Биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии Дальневосточного отделения РАН, Российская Федерация, 690022, г. Владивосток, пр. 100-летия Владивостока, 159; старший научный сотрудник лаборатории экологии и эволюционной биологии водных организмов Института Мирового океана (школа), Дальневосточный федеральный университет, Российская Федерация, 690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10; <https://orcid.org/0000-0002-1752-8720>; ejarikova@mail.ru

Виктория Андреевна Семаль, кандидат биологических наук, доцент кафедры почвоведения, старший научный сотрудник лаборатории экологии и эволюционной биологии водных организмов Института Мирового океана, Дальневосточный федеральный университет, Российская Федерация, 690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10; старший научный сотрудник, Федеральный научный центр Биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии Дальневосточного отделения РАН, Российская Федерация, 690022, г. Владивосток, пр. 100-летия Владивостока, 159; <https://orcid.org/0000-0002-6403-2779>; semal.va@dvfu.ru

Ольга Владимировна Нестерова, кандидат биологических наук, доцент кафедры почвоведения Института Мирового океана, Дальневосточный федеральный университет, Российская Федерация, 690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10; <https://orcid.org/0000-0002-3463-0962>; nesterova.ov@dvfu.ru

Поступила в редакцию: 24.03.2025

Поступила после рецензирования: 21.04.2025

Принята к публикации: 03.02.2026

REFERENCES

1. Brevik E.C., Sauer T.J. The past, present, and future of soils and human health studies. *Soil*, 2015, no. 1, pp. 35–46.
2. Ushakova E.S., Belkin P.A. Modern technologies for remediation of bottom sediments contaminated with heavy metals. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 11, pp. 54–68. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2024/11/4521.
3. Hou D., Jia X., Wang L., McGrath S.P., Zhu Y.G., Hu Q., Zhao F.J., Bank M.S., O'Connor D., Nriagu J. Global soil pollution by toxic metals threatens agriculture and human health. *Science*, 2025, vol. 388, pp. 316–321. DOI: 10.1126/science.adr5214.
4. *Geographical encyclopedic dictionary. Concepts and terms*. Eds. E.B. Alaev, V.M. Kotlyakov, V.S. Preobrazhensky, A.F. Treshnikov. Moscow, Soviet Encyclopedia Publ., 1988. 456 p. (In Russ.)
5. Mikhailov V.N., Dobrovolsky A.D., Dobrolyubov S.A. *Hydrology*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2007. 463 p. (In Russ.)
6. Ezhova A.V., Ten T.G. *Lithology of oil and gas strata*. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2013. 122 p. (In Russ.)
7. Kuksina L.V. Suspended sediment yield characteristics variability in rivers of Kamchatka Krai. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series*, 2019, no. 1, pp. 52–61. (In Russ.) DOI: 10.31857/S2587-55662019152-61.
8. Zakharikhina L.V., Litvinenko Yu.S. Geochemical features of the bottom sediments in the river network of the Kamchatka peninsula. *Bulletin of Kamchatka Regional Association «Educational-Scientific Center» Earth Sciences*, 2018, vol. 40, no. 4, pp. 23–37. (In Russ.) DOI: 10.31431/1816-5524-2018-4-40-23-37.
9. Bocharnikov V.N., Kirichenko V.E., Gerasimov Yu.N. Current tasks of conservation of major integral mountain forest geosystems of the Kamchatka in the context of practical use of geoconcept of wilderness. *InterCarto. InterGIS*, 2019, vol. 25, no. 2, pp. 309–320. (In Russ.) DOI: 10.35595/2414-9179-2019-2-25-309-320.
10. Golodnaya O.M., Zharikova E.A. Peculiarities of particle-size distribution and density of the cultivated alluvial soils in the Far East. *Vestnik of Buryat State Academy of Agriculture named after V. Philippov*, 2016, vol. 42, no. 1, pp. 19–26. (In Russ.)

11. Klochkov N.G., Klimova A.V., Ocheretyan S.O., Kusidi A.E., Kasperovich E.V. Influence of the antropogenous pollution on Rakovaya bay benthic communities (Avacha bay, south-eastern Kamchatka). *Bulletin of Kamchatka state technical university*, 2016, no. 35, pp. 53–64. (In Russ.) DOI: 10.17217/2079-0333-2016-35-53-64.
12. Ermolin M.S., Fedotov P.S., Malik N.A., Karandashev V.K. Nanoparticles of volcanic ash as a carrier for toxic elements on the global scale. *Chemosphere*, 2018, vol. 200, pp. 16–22. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.02.089.
13. Zakharihkina L.V., Litvinenko Y.S. Chemical composition of soils in the areas of volcanic ashfalls around active volcanoes in Kamchatka. *Eurasian Soil Science*, 2016, vol. 49, no. 3, pp. 305–314. DOI: 10.1134/S1064229316030121.
14. Avdoshenko V.G., Klimova A.V. Assessment of soil heavy metal pollution in Petropavlpvsk-Kamchatsky (Kamchatka territory). *Bulletin of Kamchatka state technical university*, 2022, no. 61, pp. 65–81. (In Russ.) DOI: 10.17217/2079-0333-2022-61-65-81.
15. Chuyan G.N., Bykasov V.E. Sedimentation peculiarities in the Avacha Gulf. *Conservation of biodiversity of Kamchatka and coastal waters. Proceeding of II scientific conference*. Petropavlovsk-Kamchatsky, April 9–10, 2001. pp. 194–195. (In Russ.)
16. Sokolov I.A. *Volcanism and soil formation*. Moscow, Nauka Publ., 1973. 224 p. (In Russ.)
17. Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I., Gerasimova M.I. *Classification and diagnostics of Russian soils*. Smolensk, Oikumena Publ., 2004. 342 p. (In Russ.)
18. SS 17.4.4.02.2017 *Soils. Methods of sampling and preparation of samples for chemical, bacteriological, and helminthological analysis*. Moscow, Standartinform Publ., 2018. 21 p. (In Russ.)
19. HDPE F 16.2.2.2.3.71-2011 *Quantitative chemical analysis of soils. A method for measuring the mass fractions of metals in wastewater sediments, bottom sediments, and plant samples using spectral methods*. Moscow, 2011. 39 p. (In Russ.)
20. *Agrochemical methods of soil study*. Moscow, Nauka Publ., 1975. 656 p. (In Russ.)
21. SanPiN 1.2.3685-21 *Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans*. Moscow, 2021. 1029 p. (In Russ.)
22. Zharikova E.A. Assessment of heavy metals content and environmental risk in urban soils. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 1, pp. 164–173. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2021/1/3009
23. Zharikova E.A., Klyshevskaya S.V., Popova A.D. Features of the chemical composition of soils and bottom sediments of valley of the Vtoraya Rechka river (Vladivostok, Russia). *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2024, vol. 50, pp. 48–62. (In Russ.) DOI: 10.26516/2073-3402.2024.50.48.
24. Galysheva Yu.A., Pelekh A.D., Boychenko T.V., Nesterova O.V., Yakovleva A.N. Organic matter in the ecosystem of the Vladimir Bay (the Sea of Japan): food resource and environmental risk factor. *Marine Biological Journal*, 2023, vol. 8, no. 2, pp. 18–41. DOI: 10.21072/mbj.2023.08.2.02.
25. Wang J., Yuan J., Hou Q., Yang Z., You Yu., Yu T., Ji J., Dou L., Ha X., Sheng W., Liu X. Distribution of potentially toxic elements in soils and sediments in Pearl River Delta, China: natural versus anthropogenic source discrimination. *Science of The Total Environment*, 2023, vol. 903, pp. 166573. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.166573.
26. Saleem M., Pierce D., Wang Y., Sens D.A., Somji S., Garrett S.H. Heavy metal(oid)s contamination and potential ecological risk assessment in agricultural soils. *Journal of Xenobiotics*, 2024, vol. 14, pp. 634–650. DOI: 10.3390/jox14020037.
27. Kumar S., Pandita S., Setia R. Ameta-analysis of potential ecological risk evaluation of heavy metals in sediments and soils. *Gondwana Research*, 2022, vol. 103, pp. 487–501. DOI: 10.1016/j.gr.2021.10.028.
28. Peng J.Y., Zhang S., Han Y.Y., Bate B., Ke H., Chen Y.M. Soil heavy metal pollution of industrial legacies in China and health risk assessment. *Science of the Total Environment*, 2022, vol. 816, pp. 151632. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.151632.
29. Xiang Q., Yua H., Chub H., Hua M., Xua T., Xuc X., He Z. The potential ecological risk assessment of soil heavy metals using self-organizing map. *Science of the Total Environment*, 2022, vol. 843, pp. 156978. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.156978.
30. Gao J., Gong J., Yang J., Wang Zh., Fu Ya., Tang Sh., Ma Sh. Spatial distribution and ecological risk assessment of soil heavy metals in a typical volcanic area: Influence of parent materials. *Heliyon*, 2023, vol. 9, no. 1, pp. e12993. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e12993.
31. Adimalla N., Gao Y., Wang Z., Quan H. Spatial distribution, contamination characteristics and potential ecological risk assessment of trace metals in surface soils of south-central stretch of India. *Water Air and Soil Pollution*, 2024, vol. 235, pp. 522. DOI: 10.1007/s11270-024-07344-6.
32. Candeias C., Ávila P.F., Sequeira C., Manuel A., Rocha F. Potentially toxic elements dynamics in the soil rhizospheric-plant system in the active volcano of Fogo (Cape Verde) and interactions with human health. *Catena*, 2022, vol. 209, no. 1, pp. 105843. DOI: 10.1016/j.catena.2021.105843.
33. Li Q., Chen M., Zheng X., Chen W. Determination of tungsten's toxicity coefficient for potential ecological risk assessment. *Environmental Research Communications*, 2023, vol. 5, no. 2, pp. 025003. DOI: 10.1088/2515-7620/acab4e.
34. Cao Y., Wang R., Liu Y., Li Y., Jia L., Yang Q., Zeng X., Li X., Wang Q., Wang R., Riaz L. Improved calculations of heavy metal toxicity coefficients for evaluating potential ecological risk in sediments based on seven major Chinese water systems. *Toxics*, 2023, vol. 11, p. 650. DOI: 10.3390/toxics11080650.
35. Podlasek A., Vaverkova M.D., Jakimiuk A., Koda E. Potentially toxic elements (PTEs) and ecological risk at waste disposal sites: an analysis of sanitary landfills. *PLoS ONE*, 2024, vol. 19, no. 5, pp. e0303272. DOI: 10.1371/journal.pone.0303272.
36. Luo Y., Wang N., Liu Z., Sun Y., Lu N. Characteristics and risk assessment of potentially toxic elements pollution in river water and sediment in typical gold mining areas of Northwest China. *Scientific Reports*, 2024, vol. 14, pp. 12715. DOI: 10.1038/s41598-024-63723-3.
37. Kabata-Pendias A. *Trace elements in soils and plants*. 4th ed. Boca Raton, CRS Press, 2011. 548 p.
38. Grigorev N.A. *Chemical element distribution in the upper continental crust*. Ekaterinburg, UB RAS Publ., 2009. 383 p. (In Russ.)
39. Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geo Journal*, 1969, vol. 2, pp. 108–118.
40. Kowalska J.B., Mazurek R., Gasiorek M., Zaleski T. Pollution indices as useful tools for the comprehensive evaluation of the degree of soil contamination. A review. *Environmental Geochemistry and Health*, 2018, vol. 40, pp. 2395–2420. DOI: 10.1007/s10653-018-0106-z.

41. Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach. *Water Research*, 1980, vol. 14, no. 8, pp. 975–1001.
42. MacDonald D.D., Ingersoll C.G., Berger T.A. Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2000, no. 39, pp. 20–31.
43. Vodyanitskii Y.N. Organic matter of urban soils. *Eurasian Soil Science*, 2015, vol. 48, no. 8, pp. 802–811. DOI: 10.1134/S1064229315080116.
44. Eremchenko O.Z., Moskvina N.V. The properties of soils and technogenic surface formations in the multistory districts of Perm city. *Eurasian Soil Science*, 2005, vol. 38, no. 7, pp. 688–694.
45. Zharikova E.A. The influence of agrogenic effects on phosphorus content in the soils of Kamchatka. *Conservation of biodiversity of Kamchatka and coastal waters. Proceeding of XVI scientific conference*. Petropavlovsk-Kamchatsky, November 18–19, 2015. Petropavlovsk-Kamchatsky, Kamchatpress Publ., 2015. pp. 175–178. (In Russ.)
46. Golobova A.G. Investigation of the spatial distribution of microelements in soils by the method of multivariate statistical analysis (on the example of the territory of the Daldyn kimberlit field, Northwestern Yakutia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 3, pp. 89–103. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2023/3/3875.
47. Chuyan G.N., Bykasov V.E. Anthropogenic pollution of Kamchatka lagoons. *Works of the Kamchatka branch of the Pacific Institute of Geography of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences*. Petropavlovsk-Kamchatsky, Kamchatsky Pechatny Dvor Publ. House, 2004. Iss. V, pp. 411–420. (In Russ.)
48. *Geodynamics, magmatism and metallogeny of the East of Russian Federation*. Ed. by A.I. Khanchuk. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2006. B. 1, 572 p. (In Russ.)
49. Shishkanova K.O., Okrugin V.M., Filosofova, T.M. Features of the mineralogy of the ores of the southern flank of the mutnovskoe gold–silver–polymetallic deposit (Southern Kamchatka). *Geology of ore deposits*, 2024, vol. 66, pp. 142–158. DOI: 10.1134/S1075701524010057.
50. Schweigert P.E., Zhegunov P.S., Moskaleva S.V. Ore mineralization of the Mutnovskoe gold-silver-base metal deposit, northern flank (Kamchatka). *Bulletin of Kamchatka Regional Association «Educational-Scientific Center» Earth Sciences*, 2024, vol. 61, no. 1, pp. 72–82. (In Russ.) DOI: 10.31431/1816-5524-2024-1-61-72-82.
51. Okrugin V.M., Malik N.A., Zobenko O.A., Kudaeva Sh.S., Moskaleva S.V., Plutakhina E.Yu., Skilskaya E.D., Shishkanova K.O., Yablokova D.A. Active volcanoes and rare metal mineralization of the Kamchatka Territory. *Volcanism and related processes. Proceedings of the XX regional scientific conference*. Petropavlovsk-Kamchatsky, 2017. pp. 189–191. (In Russ.)

Information about the authors

Elena A. Zharikova, Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 159, 100-letia Vladivostoka avenue, Vladivostok, 690022, Russian Federation; Senior Researcher, Far Eastern Federal University, 10, Ayaks, Russky Island, Vladivostok, 690922, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-1752-8720>; ejarikova@mail.ru

Viktoriya A. Semal, Cand. Sci. (Biol.), Associate Professor, Senior Researcher, Far Eastern Federal University, 10, Ayaks, Russky Island, Vladivostok, 690922, Russian Federation; Senior Researcher, Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 159, 100-letia Vladivostoka avenue, Vladivostok, 690022, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-6403-2779>; semal.va@dvfu.ru

Olga V. Nesterova, Cand. Sci. (Biol.), Associate Professor, Far Eastern Federal University, 10, Ayaks, Russky Island, Vladivostok, 690922, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-3463-0962>; nesterova.ov@dvfu.ru

Received: 24.03.2025

Received: 21.04.2025

Accepted: 03.02.2026