УДК 631.4:504.5
DOI: 10.18799/24131830/2025/3/4785
Шифр специальности ВАК: 1.6.21

Оценка потенциального геоэкологического риска загрязнения почвенного покрова при освоении коренных месторождений алмазов (на примере Далдыно-Алакитского горнопромышленного района)

А.Г. Гололобова✉

Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Россия, г. Якутск

✉nuta0687@mail.ru

Аннотация. ***Актуальность.*** В промышленных регионах потенциально токсичные элементы служат важнейшими индикаторами загрязнения окружающей среды, создавая потенциальный риск для экологии и здоровья экосистемы, а также человека. Почва является главным геохимическим поглотителем различных загрязняющих веществ и представляет собой среду для переноса многих загрязняющих веществ в атмосферу, гидросферу и биомассу. Поэтому необходимо провести комплексное исследование геоэкологических рисков от потенциально токсичных элементов в почвах. ***Цель.*** Оценка потенциального геоэкологического риска загрязнения почвенного покрова на территории промышленной площадки Удачнинского горно-обогатительного комбината с использованием различных индексов оценки загрязнения. ***Объекты.*** Доминирующие типы почв северо-таежных ландшафтов Далдынского кимберлитового поля. ***Методы.*** Атомно-абсорбционный, статистические методы. ***Результаты и выводы.*** Проведена оценка потенциальных источников загрязнения почв и геоэкологических рисков с использованием таких показателей загрязнения, как индекс геоаккумуляции, индекс Немерова, индекс загрязнения, индекс нагрузки загрязнения, потенциальный экологический риск. Результаты анализа данных индексов и рисков показали, что почвы территории исследования преимущественно загрязнены Ni, Co, Cr и Mn. Высокий потенциальный экологический риск имели 19,51 % объектов в зоне исследования по Mn и Ni, а низкий потенциальный экологический риск – всего 4,87 %. Анализ пространственного распределения различных индексов загрязнения показал схожие картинки, где выявлены локальные точки с высокими значениями индексов загрязнения. Горячие точки отмечены на участках воздействия отвала трубки «Удачный» и «Зарница» хвостохранилища № 2.

Ключевые слова: потенциально токсичные элементы, загрязнение, почва, кимберлитовое поле, Якутия

Благодарности: Статья подготовлена в рамках выполнения проекта по Гранту РНФ № 24-27-20128 «Исследование, идентификация и оценка потенциального геоэкологического риска загрязнения природной среды при поисках и освоении месторождений полезных ископаемых в резко континентальных биоклиматичеких условиях».

Для цитирования: Гололобова А.Г. Оценка потенциального геоэкологического риска загрязнения почвенного покрова при освоении коренных месторождений алмазов (на примере Далдыно-Алакитского горнопромышленного района) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 3. – С. 7–17. DOI: 10.18799/24131830/2025/3/4785

UDC 631.4:504.5
DOI: 10.18799/24131830/2025/3/4785

Assessment of the potential geoecological risk of soil pollution during the development of primary diamond deposits (a case study in the Daldyn-Alakitsky mining and industrial region)

A.G. Gololobova✉

Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

✉nuta0687@mail.ru

Abstract. ***Relevance.*** Potentially toxic elements serve as the most important indicators of environmental pollution, creating a potential risk for the ecology and health of the ecosystem, as well as humans in industrial regions. Soil is the main geochemical sink for various pollutants and provides a medium for the transport of many pollutants to the atmosphere, the hydropheric and biomass. Therefore, it is necessary to conduct a comprehensive study to assess geoecological risks from potentially toxic elements in soils. ***Aim.*** Assessment of the potential geoecological risk of soil contamination on the territory of the industrial site of the Udachny Mining and Processing Division using various pollution assessment indices. ***Objects.*** Dominant soil types in the northern taiga landscapes of the Daldyn kimberlite field. ***Methods.*** Atomic absorption, statistical methods. ***Results and conclusions.*** The author has carried out the assessment of potential sources of soil pollution and geoecological risks using such pollution indicators as the geoaccumulation index, Improved Nemerov index, pollution index, pollution load index, potential ecological risk. The soils of the study area are predominantly contaminated with Ni, Co, Cr and Mn. 19.51% of objects in the study area had a high potential environmental risk for Mn and Ni, and only 4.87% had a low potential environmental risk. Analysis of the spatial distribution of various pollution indices showed similar pictures. Local points with high values of pollution indices were identified. Hot spots were noted in the areas affected by the Udachny and Zarnitsa pipes dumps and tailings dump no. 2.

Keywords: potentially toxic elements, pollution, soil, kimberlite field, Yakutia

Acknowledgements: The article was carried out within the framework of the project under the Russian Science Foundation Grant no. 24-27-20128 “Research, identification and assessment of the potential geoecological risk of environmental pollution during the search and development of mineral deposits in sharply continental bioclimatic conditions”.

For citation: Assessment of the potential geoecological risk of soil pollution during the development of primary diamond deposits (a case study in the Daldyn-Alakitsky mining and industrial region). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 3, pp. 7–17. DOI: 10.18799/24131830/2025/3/4785

Введение

В течение последних десятилетий быстрая индустриализация оказала существенное влияние на экологическое состояние окружающей природной среды и привела к аккумуляции загрязняющих веществ, постоянно увеличивая уровень потенциально токсичных элементов (ПТЭ), циркулирующих в окружающей среде [1, 2]. Согласно исследованиям, под потенциально токсичными элементами понимают микроэлементы, токсичные в определенных концентрациях для наземных и водных организмов, а также для человека.

Основным источником поступления ПТЭ в окружающую среду являются выбросы, имеющие литогенное происхождение, связанные с геологическими процессами, а также антропогенные выбросы [3]. В горнодобывающих районах компоненты среды обогащены ПТЭ, поэтому отрасли, связанные с добычей и обогащением полезных ископаемых, вносят значительный вклад в их поступление в наземные и водные экосистемы [4, 5]. Самое большое влияние на окружающую природную среду оказывают открытые горные работы, например разработка коренных месторождений алмазов, при которых выполнение технологических операций сопровождается прямыми геомеханическими нарушениями: созданием выемок и карьеров, образованием отвалов – аэродинамическими, изменением режима водных объектов, созданием хвостохранилищ и шламонакопителей – гидрогеологическими нарушениями [6, 7]. Вследствие чего наибольшему негативному воздействию подвергается литосфера с нарушением рельефа местности и формированием нового техногенного ландшафтного облика. Опосредованное воздействие сопровождается образованием техногенных геохимических аномалий в компонентах ландшафта, где почва является главным геохимическим поглотителем различных загрязняющих веществ и представляет собой среду для переноса многих загрязняющих веществ в атмосферу, гидросферу и биомассу [8–10].

В настоящее время достаточно мало исследований содержания ПТЭ в почве в алмазодобывающих районах. Основной целью настоящих исследований является выявление геоэкологических рисков и возможных источников концентрации ПТЭ в почвенном покрове промышленной площадки алмазодобывающего комбината с использованием многомерных статистических методов и индексов оценки риска для здоровья на примере одного из наиболее крупных предприятий алмазодобычи в России. Исследование загрязнения почвы ПТЭ, предоставляющее научное руководство для раннего предупреждения неблагоприятных последствий, а также снижения георисков, является важным результатом геоэкологического состояния почв.

Объекты и методы исследования

Район исследования расположен в центральной части Далдыно-Алакитского горнопромышленного района Северо-Западной Якутии (северо-восток России), на территории Далдынского кимберлитового поля (N 66°25′47″, E 112°24′07″), в пределах промышленной площадки Удачнинского горно-обогатительного комбината (рис. 1).

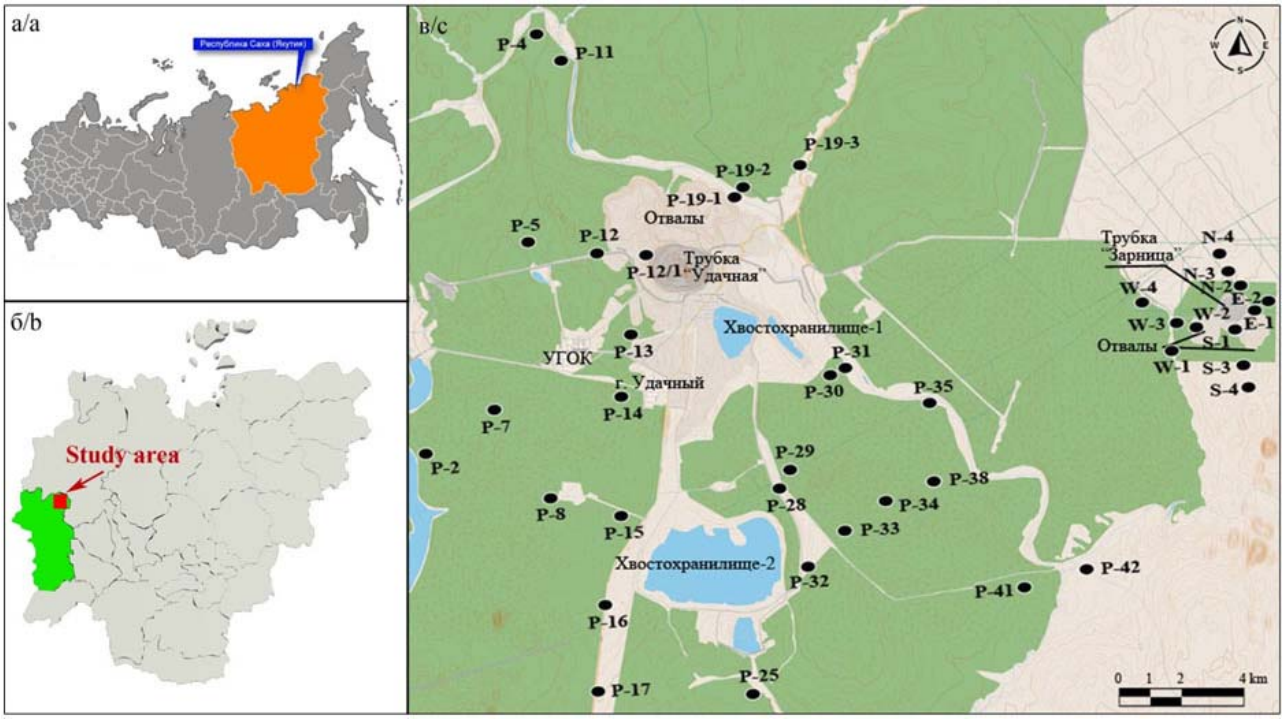


Рис. 1. *Карта месторасположения района исследования с нанесением точек опробования почв на территории Удачнинского горно-обогатительного комбината*

Fig. 1. *Map of the location of the study area with plotting soil sampling points on the territory of the Udachny Mining and Processing Division (MPD)*

Территория Далдыно-Алакитского горнопромышленного района находится в зоне сплошного распространения и близкого залегания многолетнемерзлых пород. Климат резко-континентальный, со среднегодовой температурой 12,7 ℃, амплитуда максимума и минимума средних данных по месяцам составляет от –41,6 до 14,8 ℃. Перепад средних температур между холодным и теплым временами года очень велик и составляет от 34 до –64 ℃. Среднегодовые суммы осадков равны 200–250 мм, и 75–80 % их выпадает в теплое время года (с апреля по октябрь). Снежный покров сохраняется в течение 220–250 дней в году, высота его невелика [11]. Рельеф территории исследований холмисто-пологоувалистый с абс. отм. 400–500 м и относительными превышениями над ближайшими водотоками 100–250 м [12].

Территория Далдынского кимберлитового поля приурочена к области сопряжения юго-западного склона Анабаро-Оленекской антеклизы и северо-восточного борта Тунгусской синеклизы [13]. В его строении участвуют кристаллические породы архея, карбонатные и терригенно-карбонатные отложения венда, кембрия, ордовика и силура, терригенные образования карбона. Глубина залегания кристаллического фундамента составляет 2,4–2,5 км. Осадочный чехол интрудирован пластовыми телами и дайками долеритов, трубками взрыва, дайками и жилами кимберлитов. Четвертичные отложения представлены различного генезиса песками, галечниками, пылеватыми супесями, часто со значительными включениями крупнообломочного материала [14].

Основным зональным типом почв являются *Cryosols*, интразональным – *Fluvisols*, *Rendzic Leptosols* и *Umbric Gleysols* занимают подчиненное положение [15]. Растительный покров территории исследования находится в подзоне редкостойных северотаежных лиственничных лесов. Доминируют лиственничные леса, занимающие 80 % площади территории, представленные такими типами, как *Lárix gmélinii*.

Отбор проб и химический анализ. За центр площади исследований был принят карьер трубки Удачная; были отобраны образцы почвы в промышленной зоне и ее окрестностях – вблизи карьера кимберлитовых трубок, отвалов, хвостохранилищ, обогатительной фабрики и других объектов инфраструктуры. Опробование почв проводилось из поверхностного слоя почв на глубину 0–20 см, где происходят основные изменения физико-химических свойств, связанные с антропогенной нагрузкой.

Все точки наблюдения были зафиксированы с помощью системы глобального позиционирования (Global Positioning System – GPS). Классификация типов почв проводилась на ключевых площадках с погоризонтным опробованием полного почвенного профиля на всю глубину сезонно-талого слоя на основе Всемирной справочной базы [16].

Отобранные почвы были высушены до воздушно-сухого состояния. Затем почву измельчали в фарфоровой ступке и просеивали через сито диаметром 1 мм, очищая от корней растений, камней и других веществ. Почвы проанализированы на содержание подвижных форм Pb, Ni, Mn, Cd, Co, Cr, Zn и As методом атомно-абсорбционной спектрометрии на МГА-915 ГК Люмэкс в экстрагенте 1 Н HNO_3. Химический анализ каждого образца проводили в двух повторах относительно контроля аналитической точности.

Обработка данных. Полученный набор данных подвергался тестированию на нормальность распределений микроэлементов с использованием методов Колмогорова–Смирнова ($p<0,2$) и Шапиро–Уилка ($p<0,05$); если значение распределения не было нормальным, данные преобразовывали в соответствии с принципами композиционного анализа данных (CoDa) с использованием преобразования центрированного логарифмического отношения (clr) [17–20]. Для построения модели использовались только данные концентрации элементов, преобразованные методом clr, которая выполняется путем нормализации (центрирования) логарифмически преобразованных частей для каждого образца по его среднему геометрическому. Логарифмическая трансформация преобразует данные о составе (относительные значения с постоянной суммой) в многомерное реальное пространство [21], тогда как нормализация к среднему геометрическому гарантирует, что элементы с более высокой концентрацией не будут переоценены в дальнейшем статистическом анализе. Для перевода исходных данных в данные clr-преобразования использовалось программное обеспечение CoDaPack (версия 2.03.01, Университет Жироны, Испания).

Статистический анализ проводился с использованием статистического программного обеспечения SPSS 16.0 и OriginPro 2023. Кроме того, элементы контурной карты были построены методом интерполяции кригинга с помощью Surfer 25.

Индексы оценки загрязнения. Для оценки уровня загрязнения отдельных ПТЭ в почвах применяли индекс геоаккумуляции (I_{geo}) [22, 23] (1):

$$I_{geo} = log_2\left(\frac{C_n}{1{,}5\times B_n}\right), \quad (1)$$

где C_n – измеренная концентрация микроэлементов в почве (мг/кг); B_n – геохимическое фоновое значение соответствующего микроэлемента (мг/кг) или его эталонное значение n [24]. Коэффициент 1,5 используется для устранения возможных вариаций фоновых значений для данного микроэлемента в окружающей среде, а также небольших антропогенных воздействий [25]. Геохимический фон определяется как фактическое отсутствие элемента или компонента в почве, но это не обязательно означает низкую концентрацию этого элемента или компонента. Естественный фон представляет собой естественную концентрацию элемента на территории с низким или минимальным антропогенным воздействием и связан с почвообразующим материалом [26].

I_{geo} делится на следующие категории: незагрязненный ($I_{geo}\leq 0$); от незагрязненного до умеренно загрязненного ($0<I_{geo}\leq 1$); умеренно загрязненный ($1<I_{geo}\leq 2$); от умеренного до сильно загрязненного ($2<I_{geo}\leq 3$); сильно загрязненный ($3<I_{geo}\leq 4$); от сильно до чрезвычайно загрязненного ($4<I_{geo}\leq 5$) и чрезвычайно загрязненный ($I_{geo}>5$) [27].

Для оценки общих экологических рисков всех рассматриваемых ПТЭ был разработан «улучшенный» индекс Немерова (Improved Nemerow Index – *INI*) [28]. Традиционный метод комплексного индекса загрязнения Немерова может преувеличивать или ослаблять воздействие некоторых загрязняющих веществ, что приводит к отклонению оценки качества окружающей среды [29]. *INI*, основанный на индексе геоаккумуляции, более подробно определяет общее загрязнение, производимое всеми элементами. *INI* рассчитывается по формуле (2):

$$INI = \sqrt{\frac{{Igeo}^2{}_{max} + {Igeo}^2{}_{avg}}{2}}, \quad (2)$$

где $Igeo_{max}$ и $Igeo_{avg}$ – максимальное и среднее значения I_{geo} для ПТЭ в точке мониторинга соответственно.

INI делится на следующие категории: незагрязненный ($INI<0,5$); от незагрязненного до умеренно загрязненного ($0,5\leq INI<1$); умеренно загрязненный ($1\leq INI<2$); загрязнение от умеренного до сильного ($2\leq INI<3$); сильно загрязненный ($3\leq INI<4$); загрязнение от сильного до крайне загрязненного ($4\leq NI<5$); крайне загрязненный ($INI\geq 5$) [30].

Общая оценка степени загрязнения почвы проведена с использованием индекса нагрузки загрязнения (Pollution Load Index – *PLI*), который позволяет легко доказать ухудшение состояния почвы в результате накопления ПТЭ [31, 32]. *PLI* рассчитывается по формулам (3), (4):

$$PLI = (PI_1 \times PI_2 \times PI_3 \times \ldots \times PI_n)^{1/n}, \quad (3)$$

$$PI = \frac{C_n}{B_n}, \quad (4)$$

где *PI* (индекс загрязнения) представляет собой коэффициент загрязнения ПТЭ i; C_n – измеренное

значение ПТЭ в почве; B_n – геохимическое фоновое значение ПТЭ в местной почве; n – количество ПТЭ.

PLI классифицировался как незагрязненный (*PLI*≤1), от незагрязненного до умеренно загрязненного (1<*PLI*≤2), умеренно загрязненный (2<*PLI*≤3), от умеренного до сильно загрязненного (3<*PLI*≤4), сильно загрязненный (<*PLI*≤5) и очень сильно загрязненный (*PLI*>5) [33].

Для оценки токсикологического воздействия ПТЭ на экосистему применяли индекс потенциального экологического риска (Potential Ecological Risk – *RI*) [34]. Этот метод может напрямую отражать опасность одного или нескольких элементов. Подобный подход широко применяется в мире для изучения загрязнения окружающей почвы ПТЭ в различных районах добычи полезных ископаемых и для иллюстрации потенциальных экологических рисков, связанных с общим загрязнением [35]. Уравнения для этого метода следующие (5), (6):

$$E_r^i = T_r^i P_i\,, \qquad (5)$$

$$RI = \sum_{i=1}^{n} E_r^i = \sum_{i=1}^{n} T_r^i\, P_i = \sum_{i=1}^{n} T_r^i \frac{C_n}{B_n}, \qquad (6)$$

где E_r^i – потенциальный экологический фактор риска ПТЭ i; P_i – измеренное содержание элемента i (мг/кг); T_r^i – коэффициент реакции на токсичность ПТЭ i. Значения T_r^i для Pb, Ni, Mn, Cd, Co, Cr, Zn и As были установлены равными 5, 5, 1, 30, 5, 2, 1 и 10 соответственно [34–37].

RI имеет четыре категорий экологического риска: низкий экологический риск (*RI*<150), умеренный экологический риск (150≤*RI*<300), значительный экологический риск (300≤*RI*<600) и очень высокий экологический риск (*RI*>600) [38].

Результаты и их обсуждение

Результаты расчетов I_{geo} (рис. 2, *а*) показали, что значения I_{geo} варьировались от –3,03 до 1,29 для Pb, от –2,23 до 5,13 для Ni, от –3,03 до 2,71 для Mn, от –2,67 до 2,76 для Cd, от –2,90 до 3,13 для Co, от –3,66 до 3,94 для Cr, от –8,15 до 1,36 для Zn, от –2,96 до 2,11 для As. По порядку средних значений I_{geo} для восьми элементов в почвах уменьшались в следующем ряду: Ni>Mn>Cr>Co>Pb>Zn>Cd>As. Соотношения уровней загрязнения почв исследуемой территории по индексу геоаккумуляции представлены в таблице.

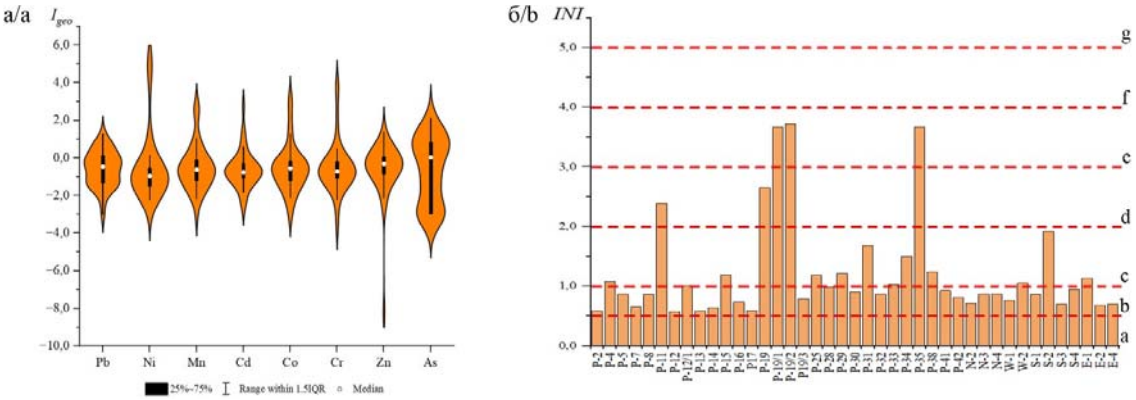


Рис. 2. *Бокс-диаграмма I_{geo} (а) и «Улучшенный» INI (б) для ПТЭ в почвах: а) незагрязненный; b) от незагрязненного до умеренно загрязненного; c) умеренно загрязненный; d) от умеренного до сильно загрязненного; e) сильно загрязненный; f) от сильно до крайне загрязненного; g) сильно загрязненный*

Fig. 2. *a) box-plots diagram of geo-accumulation index (I_{geo}); b) improved INI for potentially toxic elements (PTE) in the soils: a) uncontaminated; b) uncontaminated to moderately contaminated; c) moderately contaminated; d) moderately to heavily contaminated; e) heavily contaminated; f) heavily to extremely contaminated; g) extremely contaminated*

Таблица. *Распределение категорий загрязнения ПТЭ по индексу I_{geo}*

Table. *Distribution of pollution categories of PTE by index I_{geo}*

Категории загрязнения/Pollution categories (%)	Pb	Ni	Mn	Cd	Co	Cr	Zn	As
незагрязненный/uncontaminated	70,8	58,5	75,6	82,9	82,9	78,0	73,2	48,8
от незагрязненного до умеренно загрязненного uncontaminated to moderately contaminated	26,8	26,8	14,6	9,80	4,88	12,2	24,4	31,7
умеренно загрязненный/moderately contaminated	2,44	4,88	2,44	4,88	4,88	2,44	2,44	17,1
от умеренного до сильно загрязненного moderately to heavily contaminated	0,00	0,00	7,33	2,44	4,88	2,44	0,00	2,44
сильно загрязненный/heavily contaminated	0,00	2,44	0,00	0,00	2,44	4,88	0,00	0,00
от сильного до крайне загрязненного heavily to extremely contaminated	0,00	2,44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
сильно загрязненный/extremely contaminated	0,00	4,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

В исследуемых почвах преимущественная доля Pb, Ni, Mn, Cd, Co, Cr, Zn и As относится к незагрязненной категории и составляет 70,8; 58,5; 75,6; 82,9; 78,0; 73,2 и 48,8 %, соответственно. При этом в пробах почв имеются значения, относящиеся к загрязненной категории. Доля с умеренной категорией загрязнения составляет 2,4 и 2,44 % для Pb и Zn, соответственно; от умеренно до сильно загрязненной – 7,33; 2,44 и 2,44 % для Mn, Cd и As, соответственно; с сильным загрязнением – 2,44 и 4,88 % для Co и Cr, соответственно. Ni относится почти ко всем категориям загрязнения и достигает экстремального уровня загрязнения с долей 4,90 %. Таким образом, основными факторами риска для почв исследуемой территории являются Ni, Co, Cr и Mn.

INI по содержанию ПТЭ в почвах исследуемой территории находится в пределах 0,57–3,71 при среднем значении 1,21, что соответствует умеренному уровню загрязнения (рис. 2, *б*). Все образцы почвы имеют экологический риск загрязнения потенциально токсичными элементами (*INI*<0,5). Доля от незагрязненного до умеренно загрязненного, умеренно загрязненного, от умеренного до сильно загрязненного и сильно загрязненного составляет 58,5; 29,3; 4,88 и 7,32 % соответственно, что указывает на то, что все образцы на исследуемой территории были загрязнены в разной степени. Наибольшие значения *INI* были зафиксированы в точках Р-19-2, Р-19-1 и Р-35, которые расположены около отвала пустых пород трубки «Удачная» и зоны выхода высокоминерализованных вод.

Диапазон значений индекса *PI* почв для Pb составляет 0,18–3,69, Ni – 0,32–52,5, Mn – 0,18–9,82, Cd – 0,24–10,18, Co – 0,20–13,13, Cr – 0,12–23,06, Zn – 0,01–3,85, As – 0,19–6,46. Средние значения *PI* этих ПТЭ располагались в следующем порядке: Ni>Cr>Co>As>Mn>Cd>Zn>Pb. Средние значения этих элементов выше единицы, что указывает на загрязнение почвы этими элементами (рис. 3, *а*). *PI* Pb, Mn, Cd, Co, Zn и As свидетельствовали о легком загрязнении, Cr – об умеренном загрязнении, Ni – о высоком загрязнении. Значения *PLI* для почв в этом исследовании варьировались от 0,85 до 1,40 со средним значением 1,02 (рис. 3, *б*), что соответствует уровню от незагрязненного до умеренно загрязненного. 56,10 % проб характеризуются незагрязненным уровнем, остальные 43,9 0% относятся к категории от незагрязненного до умеренно загрязненного. Наибольшее значение *PLI* (1,40) было обнаружено в точке Р-19-2, за ним следует Р-19-1. Эти точки расположены около отвалов пустых пород трубки «Удачная». Коэффициенты загрязнения Ni, Cr, Co, Mn и As были выше, что привело к более высокому значению *PLI* в районе исследования. В точках, более отдаленных от объектов воздействия промышленной площадки Удачнинского ГОК, *PLI* были низкими (*PLI*≤1).

Значения E_r каждого элемента варьировались от 1,65 до 33,0 для Pb, от 5,0 до 819,0 для Ni, от 34,8 до 1856,0 для Mn, от 0,78 до 33,6 для Cd, от 2,7 до 173,3 для Co, от 0,22 до 42,9 для Cr, от 0,05 до 36,5 для Zn, от 0,25 до 8,4 для As (рис. 4, *а*). Порядок средних значений E_r для исследуемых элементов составляет Mn>Ni>Co>Zn>Pb>Cd>Cr>As. Результаты комплексной оценки *RI* элементов колеблются от 92,0 до 2840,9 при среднем значении 485,8. К высокому экологическому риску относились 19,51 %, а доли значительного, умеренного и низкого экологического риска составили 21,95; 53,66 и 4,88 %, соответственно. Это указывает на то, что большая часть территории исследования находилась на уровне умеренного экологического риска или выше, при этом Mn и Ni являются основными факторами риска. Наибольшее значение *RI* было обнаружено на участке отвала пустых пород трубки «Удачная» (точка Р-19-2) и около отвала трубки «Зарница» (точка S-2) (рис. 4, *б*).

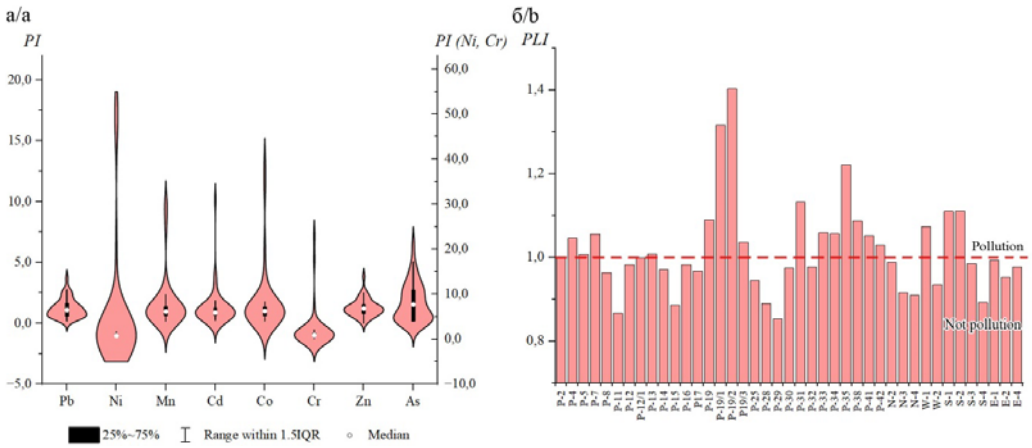


Рис. 3. *а) бокс-диаграмма индекса PI; б) PLI исследуемых точек на исследуемой территории*
Fig. 3 *a) box-plots of PI, b) PLI of the researched points in the study area*

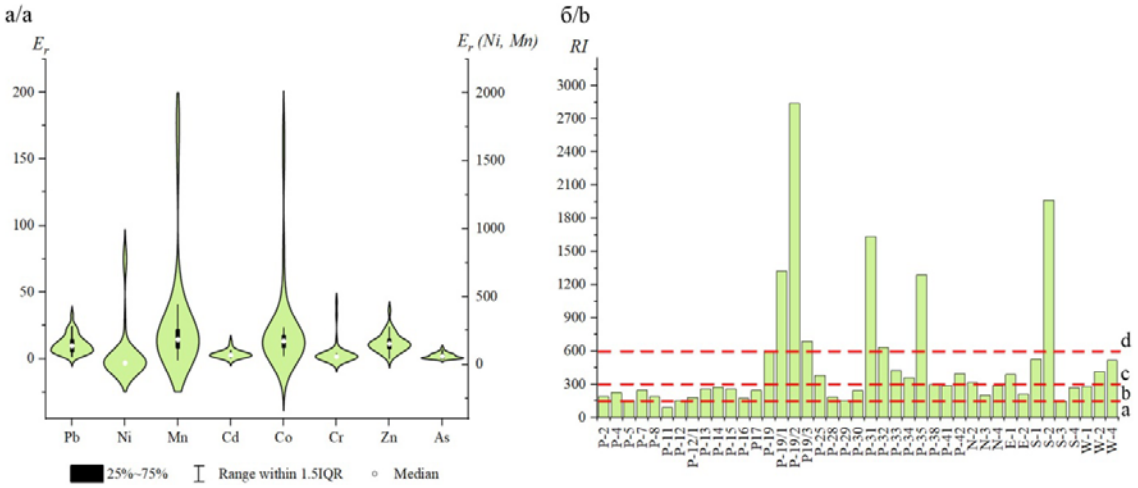


Рис. 4. *а) бокс-диаграмма потенциального фактора экологического риска (Er); б) RI: а) низкий; б) умеренный; в) значительный; г) очень высокий*
Fig. 4. *a) box-plots of potential ecological risk factor (Er); b) RI: a) low; b) moderate; c) considerable; d) very high*

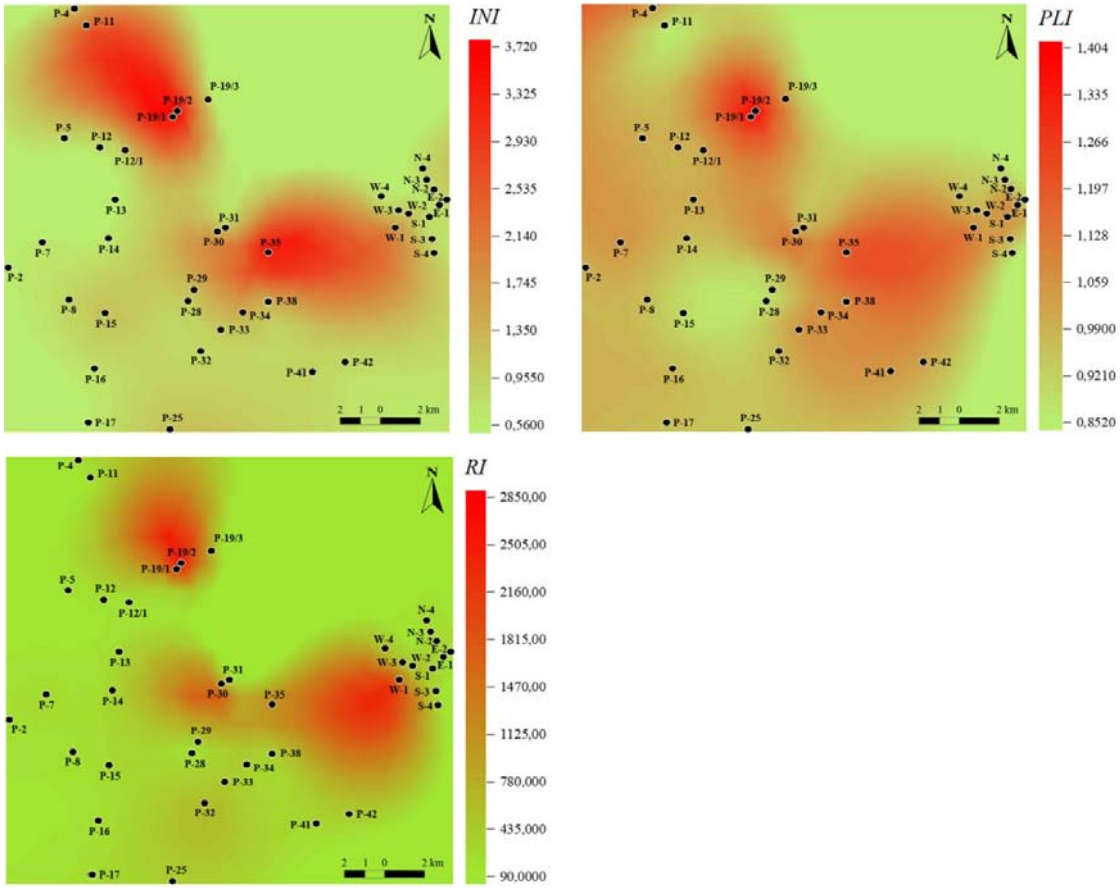


Рис. 5. *Оценка загрязнения почвы ПТЭ с применением: а) INI; б) PLI; в) RI*
Fig. 5. *Assessment of soil contamination with PTE with the help of: a) INI; b) PLI; c) RI*

В результате анализа индексов I_{geo}, *PLI* и *RI* наблюдаются схожие картинки при оценке пространственного распределения (рис. 5), примерно в одних и тех же участках фиксируются точки с высокими значениями.

Следует отметить, что существуют небольшие различия в результатах оценки применяемых индексов, главным образом из-за разных акцентов в различных методах оценки. Метод «улучшенного» *INI* более строгий, чем метод *PLI*, при оценке степени

загрязнения в некоторых точках отбора проб, поскольку этот метод отражает роль крупнейших загрязняющих элементов на экологическое состояние почвы, что приводит к более точным результатам оценки. Метод *RI* заключается, прежде всего, в том, что учитывает токсическую реакцию тяжелых металлов и объединяет экологические, токсические и экологические эффекты этих металлов для формирования индекса оценки [35, 39, 40]. Тем не менее в процессе проведения данного исследования пришли к выводу, что эти методы дополняют друг друга и имеют высокую степень эффективности.

В целом во всех трех методах выявлены элементы, которые несут наибольший вклад в загрязнении почв, – это Co, Cr, Ni, Mn – показатели ультраосновного магматизма, элементы типоморфные кимберлитам, которые отражают геохимическую специфику почв Далдынского кимберлитового поля. Накопление данных элементов показывает, что происходит вторичное загрязнение. «Горячие» точки отмечены на участках воздействия отвалов трубки «Удачная» и «Зарница», на бортах хвостохранилища № 2 и зоны выхода высокоминерализованных вод.

Таким образом, вторичное поступление взвеси мелкой пыли при ветровой эрозии пород отвалов и хвостохранилищ, воздействие транспорта и т. д. являются причинами самого высокого экологического риска, связанного с загрязнением ПТЭ.

Заключение

Результаты *INI* показали, что все пробы на исследуемой территории имели разную степень загрязнения. Среднее значение *INI* составило 1,21, что соответствует умеренному уровню загрязнения. 7,32 % образцов относились к категории сильно загрязненный. Основной вклад внесли элементы Ni, Co, Cr и Mn. Результаты расчета *PLI* выявили уровень загрязнения от незагрязненного до умеренно загрязненного. 43,9 % объектов относятся к категории от незагрязненного до умеренно загрязненного. Наибольший вклад внесли элементы Ni и Cr. Результаты оценки *RI* показали, что его среднее значение на исследуемой территории составило 485,8, что относится к значительному экологическому риску. 19,51 % объектов имели высокий экологический риск, а основными факторами риска были Mn и Ni. В результате анализа методами *INI*, *PLI* и *RI* наблюдаются схожие картинки при оценке пространственного распределения, примерно в одних и тех же участках фиксируются точки с высокими значениями данных индексов. При анализе всех трех индексов выявлены элементы, которые несут наибольший вклад в загрязнении почв, – это Co, Cr, Ni, Mn. Горячие точки отмечены на участках воздействия отвала трубки «Удачная» и «Зарница», хвостохранилища № 2 и зоны выхода высокоминерализованных вод.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Health risk assessment associated to heavy metal pollution levels in Mediterranean environment soils: a case study in the watershed of Sebkhet Ariana, Tunisia / A. Ghouma, A. Aydi, J.A.R. Martin, M. Gasmi // Arabian Journal of Geosciences. – 2022. – Vol. 15. – P. 716. DOI: 10.1007/s12517-022-09877-8.
2. Urban soil and human health: review / G. Li, G.X. Sun, Y. Ren, X.S. Luo, Y.G. Zhu // European Journal of Soil Science. – 2018. – Vol. 69. – P. 196–215. DOI: 10.1111/ejss.12518.
3. The spatial distribution of potentially toxic elements in the mountain forest topsoils (the Silesian Beskids, southern Poland) / O. Rahmonov, M. Sobala, D. Środek, D. Karkosz, S. Pytel., M. Rahmonov // Scientific Reports. – 2024. – Vol. 14. – P. 338. DOI: 10.1038/s41598-023-50817-7
4. Vareda J.P., Valente A.J.M., Duraes L.J. Assessment of heavy metal pollution from anthropogenic activities and remediation strategies: a review // Journal of Environmental Management. – 2019. – Vol. 246. – P. 101–118. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.05.126.
5. Heavy metals in soil and plants after long-term sewage irrigation at Tianjin China: a case study assessments / W. Meng, Z. Wang, B. Hu, Z. Wang, H. Li, R.C. Goodman // Agricultural Water Management. – 2016. – Vol. 171. – P. 153–161. DOI: 10.1016/j.agwat.2016.03.013
6. Бугаева Г.Г., Когут А.В. Факторы экологического риска в зоне действия открытых горных работ // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – ОВ 15. – С. 292–296.
7. Калыбеков Т. Системный анализ геоэкологического риска технологических процессов открытых горных работ // Горный журнал Казахстана. – 2013. – № 7. – С. 41–43.
8. Kabata-Pendias A. Trace elements in soils and plants. 4th ed. – Boca Raton: CRS Press, 2010. – 548 p.
9. Identifying the origins and spatial distributions of heavy metals in soils of Ju country (Eastern China) using multivariate and geostatistical approach / J. Lv, Y. Liu, Z. Zhang, J. Dai, B. Dai, Y. Zhu // Journal of Soils and Sediments. – 2015. – Vol. 15. – P. 163–178. DOI: 10.1007/s11368-014-0937-x.
10. Худякова Л.И., Войлошников О.В. Геокологические риски при разработке месторождений с магнийсиликатными породами и пути их снижения // Горный информационно-аналитический вестник. – 2018. – № 2. – С. 111–117. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-2-0-111-117.
11. Миронова С.И. Растительные сукцессии на природно-техногенных ландшафтах Западной Якутии и их оптимизация. – М.: ИД «Академия Естествознания», 2016. – 140 с.
12. Геоэкологическая ситуация в районе Айхальского ГОКа / Я. Легостаева, И. Козлова, В. Попов, Д. Ноев // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России. – Якутск, 8 апреля 2020. – Якутск: СВФУ, 2020. – С. 485.
13. Мерзлотно-гидрогеологические условия Восточной Сибири / В.В. Шепелев, О.Н. Толстихин, В.М. Пигузова, Н.М. Никитина, Н.С. Ломовцева, Л.Д. Иванова, И.А. Некрасов. – Новосибирск: Наука, 1984. – 191 с.

14. Легостаева Я.Б., Гололобова А.Г. Особенности распределения микроэлементов в почвах фоновых и импактных зон на участках алмазодобычи на северо-западе сибирской платформы // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 9. – С. 142–153. DOI: 10.18799/24131830/2021/9/3364
15. Gololobova A., Legostaeva Y. An assessment of the impact of the mining industry on soil and plant contamination by potentially toxic elements in boreal forests // Forests. – 2023. – Vol. 14. – P. 1641. DOI:10.3390/f14081641.
16. IUSS Working Group WRB, 2022. 4th ed. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. – Vienna, Austria: International Union of Soil Sciences, 2022. – 236 p.
17. Aitchison J. The statistical analysis of compositional data. – London, U.K.: Chapman and Hall, 1986. – 416 p.
18. Aitchison J. The statistical analysis of compositional data. – Caldwell, NJ, USA: Blackburn Press, 2003. – 460 p.
19. Pawlowsky-Glahn V., Buccianti, A. Compositional data analysis: theory and applications. – Wiley: Chichester, UK: West Sussex, UK, 2011. – 819 p.
20. The concept of compositional data analysis in practice – total major element concentrations in agricultural and grazing land soils of Europe / C. Reimann, P. Filzmoser, K. Fabian, K. Hron, M. Birke, A. Demetriades, E. Dinelli, A. Ladenberger // Science of The Total Environment. – 2012. – Vol. 426. – P. 196–210. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.02.032.
21. Lawley C. Compositional symmetry between Earth's crustal building blocks // Geochemical Perspectives Letters. – 2016. – Vol. 2 (2). – P. 117–126. DOI: 10.7185/geochemlet.1612.
22. Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River // Geojournal. – 1969. – Vol. 2. – P. 108–118.
23. Contamination and health risk assessment of heavy metals in China's lead–zinc mine tailings: a meta-analysis / X.Q. Kan, Y.Q. Dong, L. Feng, M. Zhou, H.B. Hou // Chemosphere. – 2021. – Vol. 267. – P. 128909. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.128909.
24. Loska K., Wiechula D., Korus I. Metal contamination of farming soils affected by industry // Environment International. – 2004. – Vol. 30. – P. 159–165. DOI: 10.1016/S0160-4120(03)00157-0.
25. Evaluation of the potential risks of heavy metal contamination in rice paddy soils around an abandoned Hg mine area in Southwest China / B. Adlane, Z. Xu, X. Xu, L. Lian, J. Han, G. Qiu // Acta Geochimica. – 2020. – Vol. 39. – P. 85–95. DOI: 10.1007/s11631-019-00364-8.
26. Ambient trace element background concentrations in soils and their use in risk assessment / M.M. Díez, F. Simón, C. Martín, I. Dorronsoro, C. García, G. Van // Science of the Total Environment. – 2009. – Vol. 407. – P. 4622–4632. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2009.05.012.
27. Spatial distribution and source identification of heavy metals in surface soils in a typical coal mine city, Lianyuan, China / J. Liang, C.T. Feng, G.M. Zeng, X. Gao, M.Z. Zhong, X.D. Li, X. Li, X.Y. He, Y.L. Fang // Environmental Pollution. – 2017. – Vol. 225. – P. 681–690. DOI: 10.1016/j.envpol.2017.03.057.
28. Heavy metal(loid)s in the topsoil of urban parks in Beijing, China: concentrations, potential sources, and risk assessment / L. Liu, Q. Liu, J. Ma, H. Wu, Y. Qu, Y. Gong, S. Yang, Y. An, Y. Zhou // Environmental Pollution. – 2020. – Vol. 260. – P. 114083. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.114083.
29. Ajani G.E., Popoola S.O., Oyatola O.O. Evaluation of the pollution status of lagos coastal waters and sediments, using physicochemical characteristics, contamination factor, Nemerow pollution index, ecological risk and potential ecological risk index // International Journal of Environment and Climate Change. – 2021. – Vol. 11. – P. 1–16. DOI: 10.9734/IJECC/2020/XXXXX.
30. Health risk assessment of heavy metal(loid)s in park soils of the largest megacity in China by using Monte Carlo simulation coupled with positive matrix factorization model / J. Huang, Y. Wu, J. Sun, X. Li, X. Geng, M. Zhao, T. Sun, Z. Fan // Journal of Hazardous Materials. – 2021. – Vol. 415. – P. 125629. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.125629.
31. Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index / D.L. Tomlinson, J.G. Wilson, C.R. Harris, D.W. Jeffrey // Helgolander Meeresun. – 1980. – Vol. 33. – P. 566–575. DOI: 10.1007/BF02414780.
32. Varol M. Assessment of heavy metal contamination in sediments of the Tigris River (Turkey) using pollution indices and multivariate statistical techniques // Journal of Hazardous Materials. – 2011. – Vol. 195. – P. 355–364. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2011.08.051.
33. Abliz A., Shi Q., Abulizi A. Contamination status and health risk assessment of soil heavy metals in the Northern slope of Eastern Tianshan Mountains industrial belt in Xinjiang, Northwest China // Forests. – 2022. – Vol. 13. – P. 1914. DOI: 10.3390/f13111914.
34. Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control-a sedimentological approach // Water Research. – 1980. – Vol. 14. – P. 975–1001. DOI: 10.1016/0043-1354(80)90143-8.
35. Characteristics and potential ecological risks of heavy metal content in the soil of a Plateau Alpine mining area in the Qilian Mountains / F. Zhang, G. Cao, S. Cao, Z. Zhang, H. Li, G. Jiang // Land. – 2023. – Vol. 12. – P. 1727. DOI: 10.3390/land12091727.
36. Ruey-An D., Yu-Tin L. Characterization and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbon contaminations in surface sediment and water from Gao-ping River Taiwan // Water Research. – 2004. – Vol. 38 (7). – P. 1733–1744. DOI: 10.1016/j.watres.2003.12.042.
37. A new ecological risk assessment index for metal elements in sediments based on receptor model, speciation, and toxicity coefficient by taking the Nansihu Lake as an example / W. Zhuang, Q. Wang, L. Tang, J. Liu, W. Yue, Y. Liu, L. Yongxia, Z. Fengxia, C. Qing, W. Mantang // Ecological Indicators – 2018. – Vol. 89. – P. 725–737. DOI: 10.1016/j.ecolind.2018.02.033.
38. Assessment of heavy metal pollution in soil and associated risks in the environs adjacent to a heavy mineral sand mine on the South Coast of Kenya / P.K. Kilavi, M.I. Kaniu, J.P. Patel, I.T. Usman // Water, Air and Soil Pollution. – 2023. – Vol. 234. – P. 748. DOI: 10.1007/s11270-023-06751-5.
39. Distribution characteristics and potential ecological risk assessment of heavy metals in soils around Shannan landfill site, Tibet / W. Zhou, Z. Dan, D. Meng, P. Zhou, K. Chang, Q. Zhuoma, J. Wang, F. Xu, G. Chen // Environmental Geochemistry and Health. – 2023. – Vol. 45. – P. 393–407. DOI: 10.1007/s10653-022-01349-y.

40. Pollution level, ecological risk assessment and vertical distribution pattern analysis of heavy metals in the tailings dam of an abandon lead-zinc mine / Q. Wang, J. Cai, F. Gao, Z. Li, M. Zhang // Sustainability. – 2023. – Vol. 15. – P. 11987. DOI: 10.3390/su151511987.

Информация об авторе
Анна Григорьевна Гололобова, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Россия, 677980, г. Якутск, пр. Ленина, 39. nuta0687@mail.ru; https://orcid.org/0000-0003-0813-5404

Поступила в редакцию: 24.07.2024
Поступила после рецензирования: 29.09.2024
Принята к публикации: 28.11.2024

REFERENCES

1. Ghouma A., Aydi A., Martin J.A.R., Gasmi M. Health risk assessment associated to heavy metal pollution levels in Mediterranean environment soils: a case study in the watershed of Sebkhet Ariana, Tunisia. *Arabian Journal of Geosciences*, 2022, vol. 15, pp. 716. DOI: 10.1007/s12517-022-09877-8.
2. Li G., Sun G.X., Ren Y., Luo X.S., Zhu Y.G. Urban soil and human health: Review. *European Journal of Soil Science*, 2018, vol. 69, pp. 196–215. DOI: 10.1111/ejss.12518.
3. Rahmonov O., Sobala M., Środek D., Karkosz D., Pytel S., Rahmonov M. The spatial distribution of potentially toxic elements in the mountain forest topsoils (the Silesian Beskids, southern Poland). *Scientific Reports*, 2024, vol. 14, pp. 338 DOI: 10.1038/s41598-023-50817-7
4. Vareda J.P., Valente A.J.M., Duraes L.J. Assessment of heavy metal pollution from anthropogenic activities and remediation strategies: a review. *Journal of Environmental Management*, 2019, vol. 246, pp. 101–118. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.05.126.
5. Meng W., Wang Z., Hu B., Wang Z., Li H., Goodman R.C. Heavy metals in soil and plants after long–term sewage irrigation at Tianjin China: a case study assessments. *Agricultural Water Management*, 2016, vol. 171, pp. 153–161. DOI: 10.1016/j.agwat.2016.03.013
6. Bugaeva G.G., Kogut A.V. Environmental risk factors in the area of open-pit mining. *Mining information and analytical bulletin*, 2007, OV 15, pp. 292–296. (In Russ.)
7. Kalybekov T. System analysis of geo-ecological risk of technological processes in open-pit mining. *Mining Journal of Kazakhstan*, 2013, vol. 7, pp. 41–43. (In Russ.)
8. Kabata-Pendias A. *Trace elements in soils and plants*. 4th ed. Boca Raton, CRS Press, 2010. 548 p.
9. Lv J., Liu Y., Zhang Z., Dai J., Dai B., Zhu Y. Identifying the origins and spatial distributions of heavy metals in soils of Ju country (Eastern China) using multivariate and geostatistical approach. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, vol. 15, pp. 163–178. DOI: 10.1007/s11368-014-0937-x.
10. Khudyakova L.I., Voiloshnikov O.V. Geocological risks in the development of deposits with magnesium silicate rocks and ways to reduce them. *Mining Information and Analytical Bulletin*, 2018, vol. 2, pp. 111–117. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236-1493-2018-2-0-111-117.
11. Mironova S.I. *Plant succession on natural-technogenic landscapes of Western Yakutia and their optimization*. Moscow, Academy of Natural Sciences Publ. House, 2016. 140 p. (In Russ.)
12. Legostaeva Y., Kozlova I., Popov V., Noev D. Geoecological situation in the area of the Aikhal Mining and Processing Plant. *Geology and mineral resources of the North-East of Russia.* Yakutsk, April 8, 2020. Yakutsk, NEFU Publ., 2020. pp. 485. (In Russ.)
13. Shepelev V.V., Tolstikhin O.N., Piguzova V.M., Nikitina N.M., Lomovtseva N.S., Ivanova L.D., Nekrasov I.A. *Permafrost-hydrogeological conditions of Eastern Siberia*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1984. 191 p. (In Russ.)
14. Legostaeva Ya.B., Gololobova A.G. Features of the distribution of microelements in soils of background and impact zones at diamond mining sites in the north-west of the Siberian platform. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 9, pp. 142–153. DOI: 10.18799/24131830/2021/9/3364
15. Gololobova A., Legostaeva Y. An assessment of the impact of the mining industry on soil and plant contamination by potentially toxic elements in boreal forests. *Forests*, 2023, vol. 14, pp. 1641. DOI: 10.3390/f14081641.
16. *IUSS Working Group WRB, 2022. 4th ed. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. Vienna, Austria, International Union of Soil Sciences (IUSS), 2022. 236 p.
17. Aitchison J. *The statistical analysis of compositional data*. London, U.K., Chapman and Hall, 1986. 416 p.
18. Aitchison J. *The statistical analysis of compositional data*. Caldwell, NJ, USA, Blackburn Press, 2003. 460 p.
19. Pawlowsky-Glahn V., Buccianti, A. *Compositional data analysis: theory and applications*. Chichester, UK, West Sussex, UK, Wiley, 2011. 819 p.
20. Reimann C., Filzmoser P., Fabian K., Hron K., Birke M., Demetriades A., Dinelli E., Ladenberger A. The concept of compositional data analysis in practice – total major element concentrations in agricultural and grazing land soils of Europe. *Science of The Total Environment*, 2012, vol. 426, pp. 196–210.
21. Lawley C. Compositional symmetry between Earth's crustal building blocks. *Geochemical Perspectives Letters*, 2016, vol. 2 (2), pp. 117–126.
22. Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geojournal*, 1969, vol. 2, pp. 108–118.
23. Kan X.Q., Dong Y.Q., Feng L., Zhou M., Hou H.B. Contamination and health risk assessment of heavy metals in China's lead–zinc mine tailings: a meta-analysis. *Chemosphere*, 2021, vol. 267, pp. 128909. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.128909.

24. Loska K., Wiechula D., Korus I. Metal contamination of farming soils affected by industry. *Environment International*, 2004, vol. 30, pp. 159–165. DOI: 10.1016/S0160-4120(03)00157-0.
25. Adlane B., Xu Z., Xu X., Lian L., Han J., Qiu G. Evaluation of the potential risks of heavy metal contamination in rice paddy soils around an abandoned Hg mine area in Southwest China. *Acta Geochimica*, 2020, vol. 39, pp. 85–95. DOI: 10.1007/s11631-019-00364-8.
26. Díez M.M., Simón F., Martín C., Dorronsoro I., García C., Van G. Ambient trace element background concentrations in soils and their use in risk assessment. *Science of the Total Environment*, 2009, vol. 407, pp. 4622–4632. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2009.05.012.
27. Liang J., Feng C.T., Zeng G.M., Gao X., Zhong M.Z., Li X.D., Li X., He X.Y. Spatial distribution and source identification of heavy metals in surface soils in a typical coal mine city, Lianyuan, China. *Environmental Pollution*, 2017, vol. 225, pp. 681–690. DOI: 10.1016/j.envpol.2017.03.057.
28. Liu L., Liu Q., Ma J., Wu H., Qu Y., Gong Y., Yang S., An Y., Zhou Y. Heavy metal(loid)s in the topsoil of urban parks in Beijing, China: concentrations, potential sources, and risk assessment. *Environmental Pollution*, 2020, vol. 260, pp. 114083. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.114083.
29. Ajani G.E., Popoola S.O., Oyatola O.O. Evaluation of the pollution status of lagos coastal waters and sediments, using physicochemical characteristics, contamination factor, nemerow pollution index, ecological risk and potential ecological risk index. *International Journal of Environment and Climate Change*, 2021, vol. 11, pp. 1–16. DOI: 10.9734/IJECC/2020/XXXXX.
30. Huang J., Wu Y., Sun J., Li X., Geng X., Zhao M., Sun T., Fan Z. Health risk assessment of heavy metal(loid)s in park soils of the largest megacity in China by using Monte Carlo simulation coupled with positive matrix factorization model. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, vol. 415, pp. 125629. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.125629.
31. Tomlinson D.L., Wilson J.G., Harris C.R., Jeffrey D.W. Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index. *Helgolander Meeresun*, 1980, vol. 33, pp. 566–575. DOI: 10.1007/BF02414780.
32. Varol M. Assessment of heavy metal contamination in sediments of the Tigris River (Turkey) using pollution indices and multivariate statistical techniques. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, vol. 195, pp. 355–364. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2011.08.051.
33. Abliz A., Shi Q., Abulizi A. Contamination status and health risk assessment of soil heavy metals in the Northern Slope of Eastern Tianshan mountains industrial Belt in Xinjiang, Northwest China. *Forests*, 2022, vol. 13, pp. 1914. DOI: 10.3390/f13111914.
34. Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control-a sedimentological approach. *Water Research*, 1980, vol. 14, pp. 975–1001. DOI: 10.1016/0043-1354(80)90143-8.
35. Zhang F., Cao G., Cao S., Zhang Z., Li H., Jiang G. Characteristics and potential ecological risks of heavy metal content in the soil of a Plateau Alpine Mining Area in the Qilian Mountains. *Land*, 2023, vol. 12, pp. 1727. DOI: 10.3390/land12091727.
36. Ruey-An D., Yu-Tin L. Characterization and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbon contaminations in surface sediment and water from Gao-ping River Taiwan. *Water Research*, 2004, vol. 38 (7), pp. 1733–1744. DOI: 10.1016/j.watres.2003.12.042.
37. Zhuang W., Wang Q., Tang L., Liu J., Yue W., Liu Y., Yongxia L., Fengxia Z., Qing C., Mantang W. A new ecological risk assessment index for metal elements in sediments based on receptor model, speciation, and toxicity coefficient by taking the Nansihu Lake as an example. *Ecological Indicators*, 2018, vol. 89, pp. 725–737. DOI: 10.1016/j.ecolind.2018.02.033.
38. Kilavi P.K., Kaniu M.I., Patel J.P., Usman I.T. Assessment of heavy metal pollution in soil and associated risks in the environs adjacent to a heavy mineral sand mine on the South Coast of Kenya. *Water, Air and Soil Pollution*, 2023, vol. 234, pp. 748. DOI: 10.1007/s11270-023-06751-5.
39. Zhou W., Dan Z., Meng D., Zhou P., Chang K., Zhuoma Q., Wang J., Xu F., Chen G. Distribution characteristics and potential ecological risk assessment of heavy metals in soils around Shannan landfill site, Tibet. *Environmental Geochemistry and Health*, 2023, vol.45, pp. 393–407. DOI: 10.1007/s10653-022-01349-y.
40. Wang Q., Cai J., Gao F., Li Z., Zhang M. Pollution level, ecological risk assessment and vertical distribution pattern analysis of heavy metals in the tailings dam of an abandon lead-zinc mine. *Sustainability*, 2023, vol. 15, pp. 11987. DOI: 10.3390/su151511987.

Information about the author

Anna G. Gololobova, Cand. Sc., Senior Researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 39, Lenin avenue, Yakutsk, 677980, Russian Federation. nuta0687@mail.ru; https://orcid.org/0000-0003-0813-5404

Received: 24.07.2024
Revised: 29.09.2024
Accepted: 28.11.2024