



ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ ВОКРУГ МУНИЦИПАЛЬНОГО ПОЛИГОНА ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ

Атоева Г. Р., Алибоева М. А.

*Национальный университет Узбекистана имени Мирзо Улугбека, Ташкент,
Республика Узбекистан, e-mail: sardorsayitov@gmail.com*

Исследование посвящено оценке содержания тяжелых металлов (Zn, Cu, Pb, Cd, Ni, Cr, As, Tl и др.) в почвах, расположенных в зоне влияния полигона твердых бытовых отходов, а также анализу их экологической опасности. Подчеркивается, что аккумуляция данных элементов в системе «почва – растение» вследствие их токсичности и стойкости может представлять серьезную угрозу для окружающей среды и здоровья населения. Для комплексной оценки использованы индексы загрязнения (RI), интегральный индекс загрязнения (IRI) и показатель потенциального экологического риска (RI). Установлено, что наибольшие значения IRI и RI характерны для западных и центральных участков полигона (MCHG²-1, MCHG²-3, MCHShi-9), тогда как минимальные значения отмечены на участке MCHShi-3. Наибольший вклад в формирование экологического риска вносит кадмий, на долю которого приходится 80–90 % суммарного показателя E_r; уровни остальных металлов соответствуют природному фону. Значения RI варьируют в пределах 57,9–146,8, что позволяет отнести исследуемые территории к категориям низкого и умеренного экологического риска. Полученные результаты могут быть использованы при планировании экологического мониторинга и разработке мероприятий по реабилитации нарушенных земель.

Ключевые слова: почва, загрязнение, деградация, тяжелые металлы, элемент, индекс экологического риска (RI), индекс загрязнения (IRI)

Благодарности: Авторы выражают признательность сотрудникам Национального университета Узбекистана имени Мирзо Улугбека за научно-методическую поддержку, содействие в организации полевых и лабораторных исследований, а также за консультации при обработке и интерпретации полученных данных.

ASSESSMENT OF THE ECOLOGICAL RISK OF SOIL CONTAMINATION BY HEAVY METALS IN THE VICINITY OF A MUNICIPAL SOLID WASTE LANDFILL

Atoeva G. R., Aliboeva M. A.

*National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek, Tashkent,
Republic of Uzbekistan, e-mail: sardorsayitov@gmail.com*

The study is devoted to the assessment of heavy metal contents (Zn, Cu, Pb, Cd, Ni, Cr, As, Tl, etc.) in soils located within the zone of influence of a municipal solid waste landfill, as well as to the analysis of their ecological hazard. It is emphasized that the accumulation of these elements in the soil-plant system, due to their toxicity and persistence, may pose a serious threat to the environment and human health. For a comprehensive assessment of soil contamination, the pollution index (RI), integrated pollution index (IRI), and potential ecological risk index (RI) were applied. The results indicate that the highest IRI and RI values are characteristic of the western and central sections of the landfill (MCHG²-1, MCHG²-3, MCHShi-9), whereas the lowest values were recorded at site MCHShi-3. Cadmium was identified as the major contributor to ecological risk, accounting for 80–90% of the total individual ecological risk factor (E_r), while the concentrations of other metals corresponded to background (natural) levels. The RI values range from 57.9 to 146.8, which allows the studied areas to be classified as zones of low to moderate ecological risk. The obtained results can be used for environmental monitoring planning and for the development of rehabilitation and remediation measures for contaminated lands.

Keywords: soil, pollution, degradation, bioaccumulation coefficient, heavy metals, risk index (RI), pollution index (IRI)

Acknowledgements: The authors express their gratitude to the staff of the Mirzo Ulugbek National University of Uzbekistan for their scientific and methodological support, assistance in organizing field and laboratory research, as well as for consultations in processing and interpreting the obtained data.

Введение

В настоящее время рост численности населения, увеличение потребности человека в различных видах продукции, а также поступление в почву отходов бытового назначения, производственных остатков и пищевых отходов неизбежно оказывают

влияние на ее состав и плодородие. Эти негативные процессы приводят к снижению плодородия почвы, изменению ее различных свойств, включая химические и биологические характеристики, нарушению активности ферментов и ухудшению почвенной структуры. В связи с этим опре-

деление уровня химического загрязнения почв, формирующегося вокруг различных источников загрязнения, изучение изменения свойств почв под воздействием техногенных факторов и разработка эффективных подходов к их охране приобретают особую актуальность. Загрязнение почв вблизи полигонов твердых бытовых отходов (ТБО) является серьезной экологической проблемой, приводящей к снижению биологического разнообразия, угнетению роста растений и изменению физико-химических свойств почв.

Основными источниками загрязнения являются органические и неорганические отходы, включая пластмассу, металлы, стекло и другие виды трудноразлагаемых материалов. Эти компоненты длительно сохраняются в почвенной среде, нарушая ее структуру, биологическую активность и функционирование экосистем. Повышенные концентрации пластиковых частиц и тяжелых металлов в почвах, прилегающих к полигонам, неоднократно отмечались различными учеными, причем их влияние распространяется как на микробиоту почвы, так и на рост растений [1].

Исследования почв на территории полигона Тегерана показали, что уровни тяжелых металлов следуют ряду: $Al > Fe > Mn > Zn > Cr > Cu > Pb > Ni > Co > As > Cd$. Экологические индексы подтвердили высокий уровень загрязнения, а концентрации Pb, Cu, Zn, Cr и Ni свидетельствуют о выраженном антропогенном воздействии [2]. Аналогичные исследования в Таиланде выявили существенное превышение мировых средних концентраций Bi, Cd, Co, Cr, Cu, Li, Ni, Pb и Zn в 90 % проб. Наиболее опасным оказалось загрязнение висмутом и кадмием, тогда как оценка канцерогенных и неканцерогенных рисков показала превышение безопасных уровней как для детей, так и для взрослых [3].

Самоочищение почвы происходит очень медленно, вследствие чего вредные вещества постепенно накапливаются и со временем начинают представлять опасность для человека, животных и растений. Длительное накопление, сжигание и захоронение бытовых отходов в почве приводит к ухудшению ее свойств и увеличению содержания загрязняющих органических соединений. Эти летучие органические соединения в результате почвенных процессов проникают в нижние горизонты, смешиваются с грунтовыми водами и загрязняют их [4]. На юго-западе Нигерии рост населения и индустриализация привели к значительному увеличению объемов отходов, что способствует загрязнению почв по-

тенциально токсичными элементами (PTE) и повышает риски для здоровья населения. Специальные исследования вблизи крупных полигонов подтвердили превышение допустимых концентраций ряда металлов и наличие потенциальных угроз для здоровья человека [5].

Анализ почв в районе санитарного полигона Луцюнган (Шаннан, Тибет) показал, что средние значения pH соответствуют сильнощелочной среде ($pH = 9,37$). Hg и Ni выявлены выше фоновых значений, тогда как остальные элементы (Cu, Pb, Zn, Cr, As, Cd) не превышали фон. Однако пространственное распределение продемонстрировало, что на западной стороне полигона концентрации Cu, Cr, Cd, Hg и Ni выше, а содержание As, Zn и Pb – несколько выше в северном, восточном и южном направлениях. Градиент снижения концентраций при удалении от полигона подтверждает его роль как основного источника загрязнения. По индексу геоаккумуляции (I_{geo}) наибольшее загрязнение связано с Hg [6].

В исследованиях 2022 г. уровень загрязнения почв вокруг полигонов и степень экологического риска оценивались с использованием комплексных индексов. Результаты показали, что Zn, Pb, Cu и Hg являются основными источниками экологического риска, а несанкционированные свалки представляют серьезную угрозу для окружающей среды и здоровья человека [7].

В Иране (Керманшох) при выборе территорий для размещения медицинских отходов применялась интегрированная многокритериальная оценка с использованием ГИС и дистанционного зондирования. Такой подход позволил учитывать экологические, социальные и экономические факторы и обеспечил комплексность принятия решений [8]. В работе Wang и соавт. (2022) был проведен анализ данных более чем 50 полигонов, в рамках которого оценивались распределение тяжелых металлов (Cr, Hg, Pb, As, Zn, Cd и др.) и факторы, влияющие на их содержание (возраст полигона, климат, географическое положение). Авторы подчеркнули, что уровень загрязнения существенно варьирует в зависимости от указанных факторов и требует комплексного мониторинга [9].

В Марокко исследования показали значительное обогащение почв Zn, Cd, Fe, Cu, Ni, Pb и Cr вокруг открытых полигонов. Индекс $PLI = 1,84$ указывает на умеренно высокие уровни загрязнения, а анализ фракционного состава металлов подтвердил их высокую подвижность. Дети наиболее уязвимы к воздействию Pb и Cd [10]. Аналогичные данные получены в Нигерии

(Абака-лики), где ведущими загрязнителями являются Fe, Zn, Cu, Pb и Cd. Индексы CF, RI, EF, I_{geo} и MRI показали значительное загрязнение и высокие экологические риски, что обосновывает необходимость применения фиторемедиации, биоремедиации и улучшения систем мониторинга [11]. В исследовании Du и соавт. (2023) выявлены высокие концентрации As, Pb, Cd и Zn в почвах, находящихся под влиянием полигонов, а также проведена оценка рисков для здоровья населения. Отмечено, что тяжелые металлы способны сохраняться в почве длительное время даже после прекращения эксплуатации полигона [12].

Кроме того, в исследовании Adu J.T. и соавт. (2025) изучались уровни накопления тяжелых металлов (Cd, Pb, Cr, Zn и др.) в почвах под воздействием полигонов и их распределение в окружающей среде. Результаты показали, что почва является основным аккумулятором тяжелых металлов, при этом Cd и Pb представляют наибольшую экологическую опасность. Также установлено, что под воздействием фильтрата происходит миграция тяжелых металлов из почвы в водную среду и их биоаккумуляция в биоте [13]. В исследованиях 2024 г. показано усиление процессов биодоступности и миграции металлов в почвах под влиянием полигонов. Особенно отмечается высокая подвижность кадмия (Cd), который характеризуется как один из наиболее опасных загрязнителей [14].

Наиболее современные исследования (2025–2026 гг.) подтверждают накопление Cd, Pb, Cu и Zn в почвах полигонов, при этом кадмий характеризуется наибольшим коэффициентом загрязнения. Также установлено, что миграция и биогеохимический круговорот тяжелых металлов активно протекают с участием растений и микроорганизмов [15].

Загрязнение тяжелыми металлами является негативным последствием свалок твердых бытовых отходов. Множественные пути переноса загрязняющих веществ (включая сточные воды, канализационные стоки и выхлопные газы), а также сложные и сосуществующие потенциальные источники загрязнения (например, сельскохозяйственная деятельность) вокруг свалок требуют сочетания различных методов оценки загрязнения и инструментов идентификации источников для определения распространения загрязнения и устранения потенциальных рисков. Экологическая оценка риска показала, что в настоящее время экологического риска нет. Однако (на основе оценки риска для здоровья) высокие концентрации Cr и As в почве пред-

ставляют собой неканцерогенный и канцерогенный риск для человека в исследуемой области соответственно. Кроме того, геоаккумуляционные индексы для Cr, Cu, Ni, Zn, As и Hg подтвердили антропогенные источники этих металлов в почве [16]. В связи с высокой токсичностью тяжелых металлов необходимо реализовать комплекс мероприятий, направленных на снижение поступления загрязняющих веществ из почв в поверхностные и подземные воды. К таким мерам относятся разработка и внедрение систематической программы экологического мониторинга, ориентированной на контроль, управление и безопасную утилизацию несанкционированных свалок и твердых бытовых отходов. Кроме того, следует ограничить использование материалов и удобрений, получаемых с подбных свалок, в сельскохозяйственных целях, поскольку тяжелые металлы способны интенсивно поглощаться растениями, в том числе овощными культурами, что представляет потенциальную угрозу для здоровья человека [17].

Цель исследования – провести комплексную оценку содержания тяжелых металлов в почвах, прилегающих к Ташкентскому городскому полигону твердых бытовых отходов, установить пространственные особенности их распределения и определить уровень потенциального экологического риска на основе расчета индексов загрязнения и интегральных показателей риска.

Материалы и методы исследования

Исследование проводилось на территории Ташкентского городского полигона твердых бытовых отходов (ТБО), расположенного в Охангаронском районе Ташкентской области. Полигон функционирует с 1966 г. и занимает площадь 59 га, из которых около 40 га используются для размещения отходов. Ежедневный объем поступающих отходов достигает 2500 т.

Почвенные образцы отбирались в четырех направлениях (север, юг, восток, запад) на расстоянии различной удаленности от полигона с глубины 0–30 см. Точки отбора были зафиксированы с использованием GPS-координат. Выбор схемы отбора проб был направлен на оценку пространственного распределения загрязняющих веществ.

Следует отметить, что в рамках данного исследования фоновые (контрольные) участки за пределами зоны влияния полигона не рассматривались, что ограничивает возможность установления строгих причинно-следственных связей.

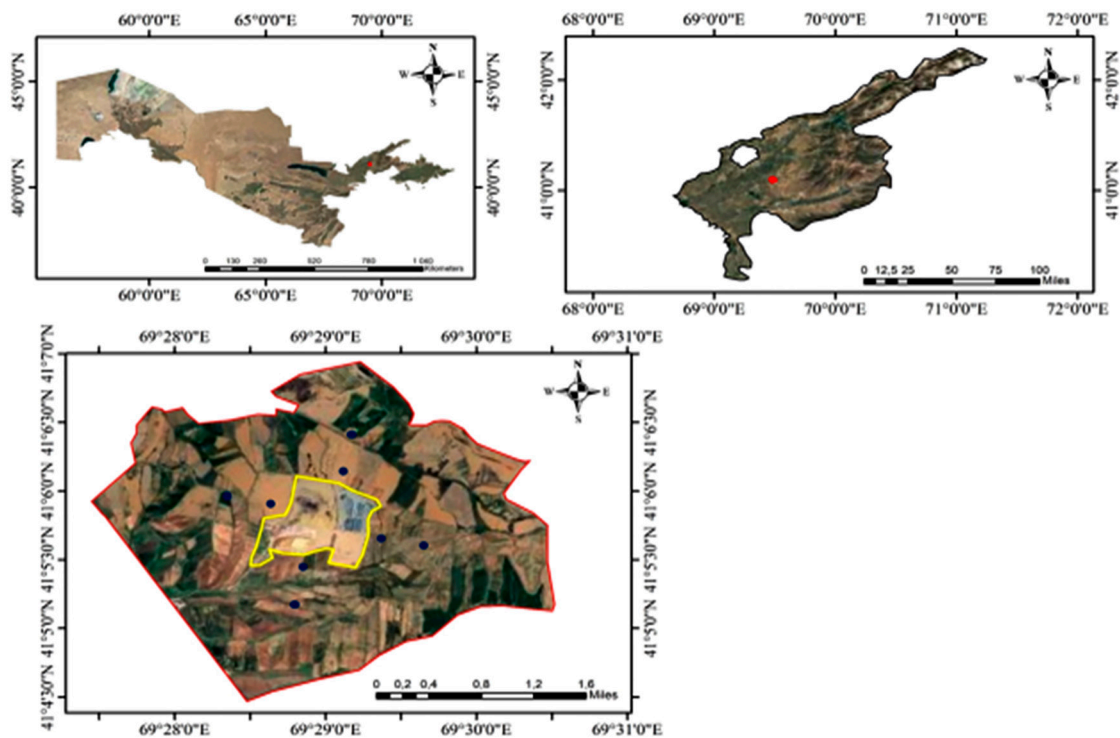


Рис. 1. Картографическая модель объекта исследований
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Почвенные образцы отбирались в четырех направлениях – южном, восточном, северном и западном секторах полигона – с глубины 0–30 см. Пробы были собраны в следующих географических координатах:

Е 069°28'42.236", N 41°05'22.348";

Е 069°28'40.585", N 41°05'21.915";

Е 069°28'59.35", N 41°05'06.68";

Е 069°28'83.986", N 41°05'13.108";

Е 069°29'21.393", N 41°05'47.208";

Е 069°29'37.197", N 41°05'65.794";

Е 69°27'36.5", N 41°05'30.7";

Е 69°28'24.1", N 41°05'20.6" (рис. 1).

На карте показано территориальное расположение Ташкентского городского полигона твердых бытовых отходов, находящегося на территории Охангаронского района Ташкентской области. Исследуемая территория определена относительно города и выделена в качестве опытного участка. На карте отображены границы исследуемого участка, роза ветров, а также точки отбора почвенных проб, которые в рамках данного исследования обозначены как пробные точки. Точки отбора проб выбраны с целью оценки пространственного распределения загрязняющих веществ в почвенном покрове. Роза ветров отражает преобладающие направления ветра на исследуемой территории и позволяет оценить потенциальные направления переноса загрязняющих ве-

ществ, обусловленные функционированием полигона. Представленная карта наглядно иллюстрирует географическое положение объекта исследования, пространственную организацию опытного участка и обоснованность схемы отбора проб, используемой для экологической оценки состояния почв.

Подготовка образцов включала высушивание при комнатной температуре, удаление посторонних включений и просеивание. Определение содержания тяжелых металлов проводилось методом индуктивно связанной плазменно-эмиссионной спектроскопии (ICP-OES). Аналитические измерения сопровождалась процедурами контроля качества: использовались стандартные образцы, проводились повторные измерения (не менее трех раз), относительная погрешность не превышала 5%, коэффициент восстановления составлял 90–105%.

Содержание тяжелых металлов в почвах и растительных образцах определялось методом индуктивно связанной плазменно-эмиссионной спектроскопии (ICP-OES). Геохимические кларковые значения (K_k) использовались для сравнительной оценки накопления элементов. Индекс загрязнения почв $RI_i = C_i/C_{clarke} = K_k$ и интегральный индекс загрязнения: $IR = \text{экологический риск}$, $IRI = \sqrt[n]{RI_1 * RI_2 * \dots * RI_n}$ (индивидуальные индексы загрязнения

для каждого из n элементов), фактор индивидуальных экологических факторов ($RI = \sum E_i^i$), потенциальный экологический риск IRI ($E_i^r = T_i \times C_i^i / C_{ib}^i$) определены с помощью формул.

Таким образом, в работе четко разграничены понятия:

- коэффициент загрязнения (Cf),
- интегральный индекс загрязнения (IRI),
- индивидуальный экологический риск (E_i^r),
- суммарный экологический риск (RI).

Полученные показатели используются для оценки экологического состояния почв. При этом они характеризуют именно экологический риск и не включают оценку риска для здоровья человека.

Результаты исследования и их обсуждение

Почвенный покров вокруг полигона твердых бытовых отходов (ТБО) считается геоэкологической средой, подверженной техногенному воздействию. Накопление тяжелых металлов (Zn, Cu, Pb, Cd, Ni, Cr, As, Tl) в этих районах связано с разложением отходов, образованием фильтрата (лихата) и их миграцией в почвенную среду. Накопление тяжелых металлов в почве может привести к их участию в биогеохимическом круговороте, распространению по биологической цепи и негативному воздействию на здоровье человека.

Уровень загрязнения почвы тяжелыми металлами оценивался с использованием коэффициента загрязнения (C^f):

$$C^f = C_b / C_{men}^i,$$

где C_b – концентрация обнаруженного в почве металла, C_i – геохимический фоновый (Кларк) уровень элемента.

По результатам расчетов значения C^f для большинства элементов близки к 1 или ниже, что указывает на то, что они не сильно отличаются от естественного фонового уровня. Однако в некоторых точках концентрация кадмия (Cd) достигает высоких значений, что указывает на его связь с техногенным источником. В то же время тот факт, что для всех образцов в предыдущих расчетах зафиксированы одинаковые значения C^f ($C^f = 0,588$), требует методологической переоценки, поскольку существует разница между реальными концентрациями.

Для оценки общего уровня загрязнения почвы был рассчитан интегральный индекс загрязнения (IRI):

$$IRI = \sum Cf.$$

Согласно результатам, наименьшее значение IRI (0,71) наблюдалось в точке

MCHShi-3, где уровень загрязнения близок к естественному фону. Наибольшее значение (1,15) было зафиксировано в точке MCHG¹-1, что указывает на умеренный уровень загрязнения. Накопление тяжелых металлов высокое в центральных и западных регионах (MCHShi-9, MCHG¹-1, MCHG¹-3), и эти районы выделяются как активные зоны загрязнения.

Анализ этих данных (рис. 2) показывает, что территории MCHShi-9, MCHG¹-1 и MCHG¹-3 относятся к зоне умеренного экологического риска, а остальные разрезы находятся на уровне низкого риска или естественного фона.

Индекс потенциального экологического (экономического) риска (ЭР) представляет собой комплексный интегральный показатель, предназначенный для оценки степени загрязнения почв высокотоксичными и умеренно токсичными металлоидами, прежде всего мышьяком (As), а также токсичными тяжелыми металлами, (Tl, Cd, Cu, Zn, Co, Ni и Cr). Данный индекс основан на совместном учете концентрации соответствующих элементов в почвенном покрове и их токсикологических характеристик и позволяет оценить потенциальную экологическую опасность загрязнения, а также возможный экономический ущерб, обусловленный деградацией почв и снижением их природно-ресурсного потенциала.

В результате проведенных исследований был определен потенциальный экологический индекс опасности элементов (As, Tl, Cd, Cu, Zn, Co, Ni, Cr), используя формулу

$$((RI = \sum E_{men}^r = \sum (T_r \times C_{ib}^i / C_{men}^i)),$$

$$E_{men}^r = T_r \times C_{ib}^i / C_{men}^i).$$

В табл. 1 представлены результаты расчетов потенциального экологического индекса концентраций по значениям Кларка (C_i), состава почв (C_b^i) и индекса токсичности (T_r) металлоида As (табл. 1).

Анализ коэффициента загрязнения (Cf = C_b / C_i) показал, что во всех исследованных образцах значения варьируют в пределах 1,69–1,70, что соответствует умеренному уровню загрязнения почв. Это свидетельствует о незначительном превышении фоновых значений содержания элементов.

Оценка индивидуального экологического риска (E_i^r) показала, что его значения изменяются в диапазоне от 1,7 до 50,7. Наибольшее значение зафиксировано в точке MCHSha-1 ($E_i^r = 50,7$), что соответствует умеренному уровню экологического риска по классификации Хокансона. В остальных точках значения E_i^r характеризуются как низкие.

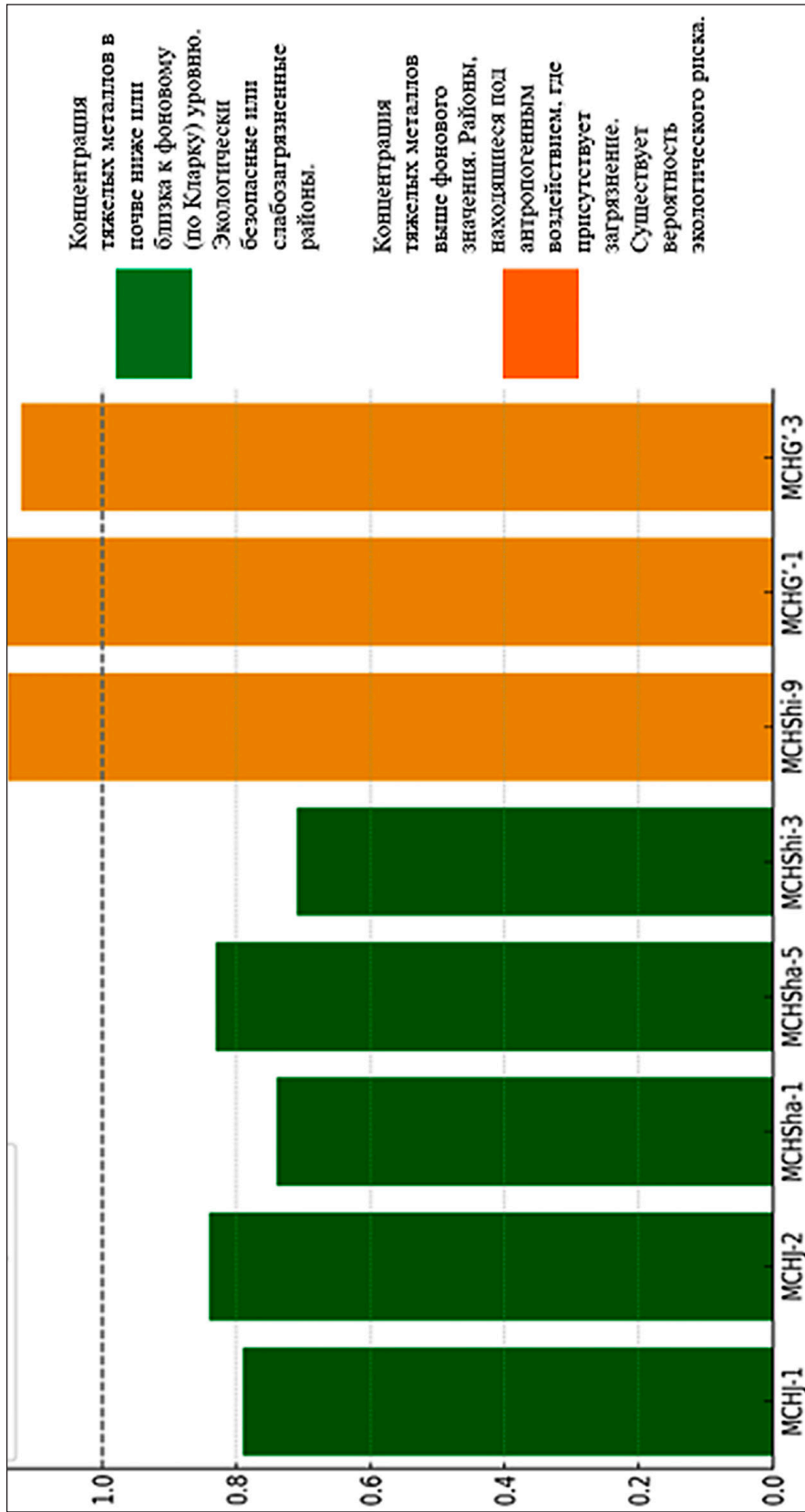


Рис. 2. Интегральный индекс экологического загрязнения (IRI) по почвенным образцам
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Таблица 1

Результаты расчетов индекса потенциального экологического риска (IRI) для элементов As (по Lars Håkanson, 1980)

№	Образец почвы	Количество элементов в почве, C_b	Концентрация Кларка, C_i	Коэффициент токсичности T_r	Экологическая опасность $RI = C_b/C_i$	Потенциальная экологическая опасность $E_i^r = RI \times T_r$
1	МСНJ-1	176,2	103,6	10	1,70	17
2	МСНJ-2	144,7	85,11	10	1,70	17
3	МСНSha-1	169,7	99,84	30	1,69	50,7
4	МСНSha-5	167,8	98,71	5	1,69	8,5
5	МСНShi-3	168,8	99,29	1	1,70	1,7
6	МСНShi-9	213,0	125,3	5	1,69	8,5
7	МСНG'-1	208,1	122,4	5	1,70	8,5
8	МСНG'-3	211,9	124,6	2	1,70	3,4

Установлено, что величина экологического риска определяется не только концентрацией элемента, но и коэффициентом его токсичности (T_r). Так, при одинаковых значениях коэффициента загрязнения более высокие значения T_r приводят к увеличению E_i^r .

Пространственное распределение показателей указывает на локальный характер загрязнения, при котором отдельные участки характеризуются повышенными значениями экологического риска.

Следует отметить, что в табл. 1 показатель RI используется как отношение C_b/C_i , что соответствует коэффициенту загрязнения (C_f). В соответствии с методикой Хокансона суммарный экологический риск (RI) должен определяться как сумма значений E_i^r , поэтому в дальнейшем расчеты требуют унификации обозначений.

Пространственное распределение значений показателей демонстрирует увеличение концентраций в отдельных участках, расположенных вблизи полигона твердых бытовых отходов. Это может свидетельствовать о возможном влиянии полигона как источника загрязнения. Однако отсутствие фоновых участков и дополнительных методов анализа (геостатистических или изотопных) не позволяет однозначно установить причинно-следственную связь, и данный вывод следует рассматривать как вероятностный.

Анализ пространственного распределения показателей таллия (Tl) показал значительную вариабельность значений в исследуемых точках. Значения показателя варьируют в широком диапазоне – от 0,5 до 17,5, что свидетельствует о выраженной пространственной неоднородности. На-

большее значение зафиксировано в точке МСНSha-1, что может указывать на локальную зону повышенного экологического воздействия. В большинстве остальных точек значения находятся в диапазоне низкого и умеренного уровня, что наглядно представлено на рисунке 3.

Минимальные значения отмечены в точках МСНShi-3 и МСНG'-3, что соответствует фоновому или близкому к нему уровню содержания элемента. В целом распределение показателей носит локальный характер и не является равномерным. Это может свидетельствовать о влиянии отдельных источников загрязнения, включая полигон ТБО. Однако отсутствие фоновых участков не позволяет однозначно подтвердить данную зависимость. Таким образом, таллий в исследуемых почвах в большинстве случаев не достигает критических уровней, однако наличие локальных аномалий требует дальнейшего мониторинга.

Анализ коэффициентов загрязнения (C_f) показал, что значения для большинства исследованных элементов варьируют в пределах 0,38–1,98. Это свидетельствует о преимущественно фоновом или умеренном уровне загрязнения почв. Наиболее высокие значения C_f зафиксированы для Zn и Cu в точках МСНShi-9 и МСНG'-1, что указывает на локальные зоны повышенного техногенного воздействия (табл. 2). В то же время для элементов Co и Ni значения C_f остаются ниже 1, что соответствует природному уровню.

Для кадмия (Cd), несмотря на относительно невысокие значения C_f (до 1,07), данный элемент может представлять экологическую опасность вследствие высокой токсичности.

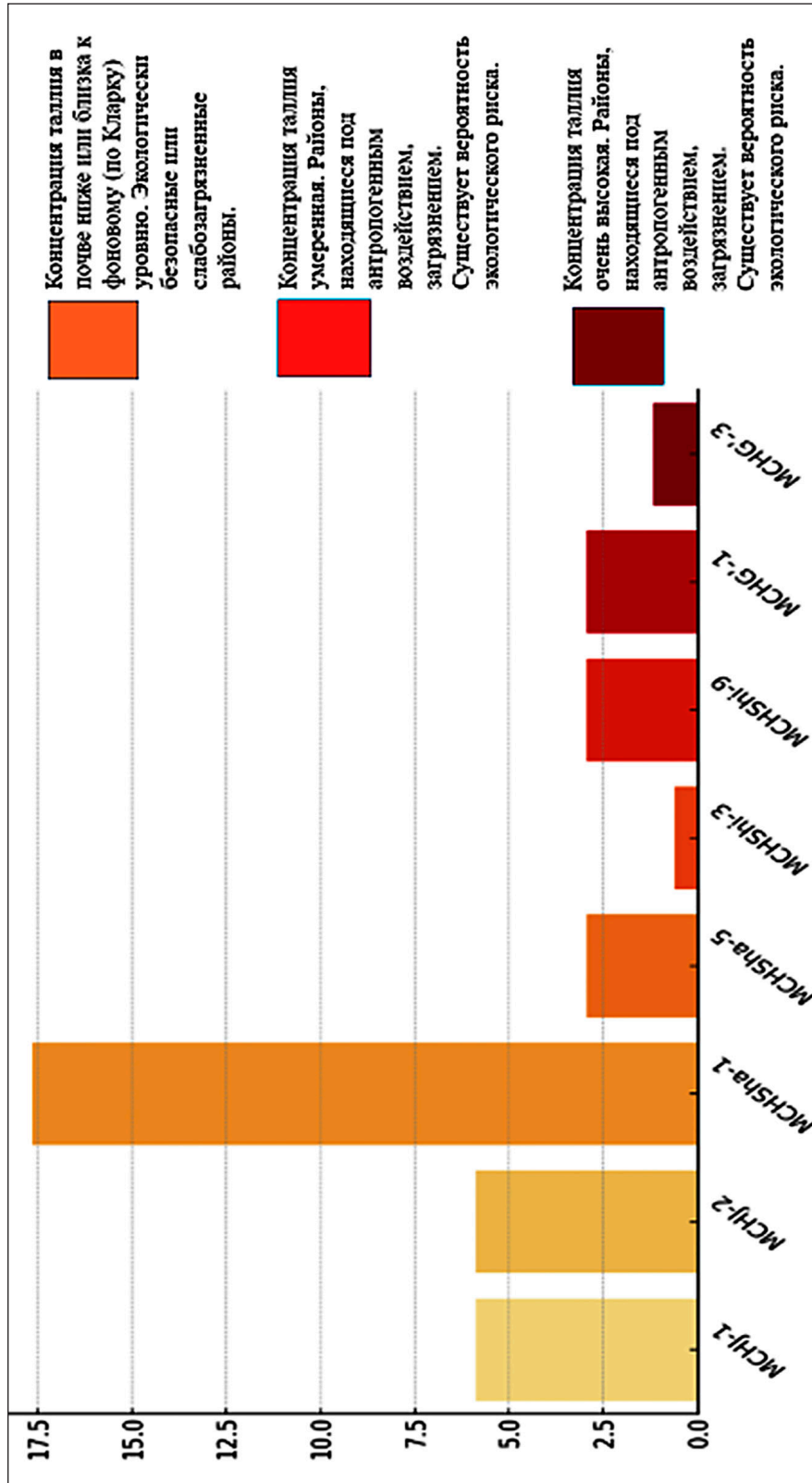


Рис. 3. Индекс экологического риска элемента TI по каждому образцу (E_i)
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Таблица 2

Индексы экологического риска особо опасных и опасных элементов

Образец	Cd (K = 0,13)		Cu (K = 47)		Zn (K = 83)		Co (K = 18)		Ni (K = 58)		Cr (K = 83)	
	Сп	Kk	Сп	Kk	Сп	Kk	Сп	Kk	Сп	Kk	Сп	Kk
MCHJ-1	0,11	0,84	33,43	0,71	77,5	0,93	11,9	0,66	35,26	0,6	68,28	0,82
MCHJ-2	0,14	1,07	37,33	0,79	72,59	0,87	11,62	0,6	40,45	0,69	78,08	0,94
MCHSha-1	0,07	0,53	39,11	0,83	87,04	1,04	10,97	0,6	38,03	0,65	67,47	0,81
MCHSha-5	0,07	0,53	61,67	1,31	80,39	0,96	12,58	0,69	46,73	0,8	76,17	0,92
MCHShi-3	0,05	0,38	46,75	0,99	77,57	0,93	13,38	0,74	45,85	0,79	85,58	1,03
MCHShi-9	0,07	0,53	81,88	1,74	160,6	1,93	18,97	1,05	57,64	0,99	112,71	1,36
MCHG'-1	0,06	0,46	60,39	1,28	164,9	1,98	19,19	1,06	57	0,98	121,74	1,47
MCHG'-3	0,06	0,46	59,43	1,26	143,4	1,72	19,49	1,08	57,88	0,99	118,97	1,43

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Таблица 3

Комплексная таблица индекса экологического риска элементов

Образец	Cd	Cu	Zn	Co	Ni	Cr	Индекс экологического риска RI ($\sum E_i r_i$)
MCHJ-1	109,5	1,8	0,47	1,75	1,86	0,84	116,2
MCHJ-2	139,5	2,05	0,44	1,70	2,10	0,96	146,8
MCHSha-1	69,3	2,15	0,53	1,60	1,98	0,82	76,4
MCHSha-5	69,3	3,35	0,49	1,85	2,46	0,92	78,4
MCHShi-3	49,5	2,55	0,47	1,95	2,40	1,04	57,9
MCHShi-9	69,3	4,45	0,98	2,80	3,06	1,50	82,1
MCHG'-1	60,0	3,30	1,00	2,80	3,00	1,54	71,6
MCHG'-3	60,0	3,25	0,87	2,85	3,06	1,50	71,5

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Пространственное распределение коэффициентов загрязнения носит неравномерный характер, что свидетельствует о локальном типе загрязнения. Наиболее загрязненные участки приурочены к центральным и западным зонам полигона.

В целом полученные данные указывают на отсутствие критического загрязнения почв тяжелыми металлами, однако наличие локальных аномалий требует дальнейшего мониторинга. Следует отметить, что оценка основана на коэффициентах загрязнения (C_f) и не включает прямую оценку экологического риска, что требует дополнительного анализа с использованием показателей $E_{i,r}$ и RI.

Следует отметить, что пространственное распределение показателей указывает на повышение концентраций загрязняющих веществ вблизи полигона ТБО. Это может свидетельствовать о возможном влиянии

полигона как источника загрязнения. Однако отсутствие фоновых участков и дополнительных методов анализа (геостатистических, изотопных или сопоставления с розой ветров) не позволяет однозначно установить причинно-следственную связь, поэтому данный вывод носит вероятностный характер. Важно подчеркнуть, что в рамках данного исследования оценка риска для здоровья человека не проводилась. Полученные результаты относятся исключительно к экологическому риску почвенной среды. Аналитические определения содержания тяжелых металлов выполнены методом ICP-OES с соблюдением процедур контроля качества, включая использование стандартных образцов, повторные измерения и оценку погрешности анализа.

Анализ суммарного экологического риска ($RI = \sum E_{i,r}$) показал, что его значения

варьируют в пределах 57,9–146,8, что соответствует низкому уровню экологического риска по классификации Хокансона. Наибольшее значение зафиксировано в точке МСНЖ-2, тогда как минимальное – в точке МСНШИ-3 (табл. 3).

Установлено, что основной вклад в формирование экологического риска вносит кадмий (Cd), значения E_{ir} которого достигают 139,5. Доля Cd составляет 80–90% от суммарного RI, что свидетельствует о его доминирующей роли. Значения E_{ir} для других элементов (Cu, Zn, Co, Ni, Cr) остаются низкими и не оказывают существенного влияния на общий уровень риска.

Пространственное распределение показателей указывает на неравномерный характер загрязнения, при котором отдельные участки характеризуются повышенными значениями экологического риска. В целом полученные результаты свидетельствуют о низком уровне экологической опасности исследуемых почв. Однако наличие локальных зон повышенного содержания кадмия требует проведения дополнительно мониторинга.

Следует отметить, что выявленные закономерности могут быть связаны с влиянием полигона ТБО, однако отсутствие фоновых участков не позволяет однозначно установить причинно-следственную зависимость.

Заключение

Проведенная оценка содержания тяжелых металлов в почвах, прилегающих к полигону твердых бытовых отходов (ТБО), выявила выраженную пространственную неоднородность загрязнения. Максимальные концентрации Cd, Zn, Cu и Cr зафиксированы в центральных и западных участках территории, тогда как северный сектор характеризуется значениями, близкими к фоновым.

Оценка степени загрязнения, выполненная с использованием коэффициента загрязнения (Cf) и интегрального индекса загрязнения (IRI), показала, что большинство участков относится к зонам низкого и умеренного уровня загрязнения ($IRI = 0,71–1,15$). Суммарный экологический риск, рассчитанный по методике Хокансона ($RI = \sum E_{ir}$), варьирует в пределах 57,9–146,8, что соответствует низкому и умеренному уровням экологического риска. Установлено, что основной вклад в формирование экологического риска вносит кадмий (Cd), доля которого составляет 80–90 % от суммарного значения RI. Это обусловлено его высокой токсичностью и подвижностью в почвенной среде. Остальные элементы (Cu, Zn, Co, Ni, Cr) характеризуются низкими значения-

ми индивидуального экологического риска (E_{ir}) и, как правило, соответствуют фоновому уровню.

Следует отметить, что примененные показатели (Cf, E_{ir} , RI и IRI) позволяют оценить уровень загрязнения и потенциальный экологический риск почв. При этом данные показатели не включают оценку риска для здоровья человека, что требует проведения дополнительных исследований. Пространственное распределение тяжелых металлов может указывать на влияние полигона ТБО как одного из источников загрязнения. Однако отсутствие фоновых площадок и дополнительных методов анализа не позволяет однозначно установить причинно-следственную связь, поэтому данный вывод носит вероятностный характер.

Полученные результаты свидетельствуют о необходимости регулярного мониторинга почв, особенно в участках с повышенными значениями экологического риска (МСНЖ-2, МСНША-1, МСНШИ-9), с акцентом на контроль миграции кадмия.

В целях снижения экологической нагрузки рекомендуется применение почвоулучшающих мероприятий (сорбенты, органоминеральные материалы, стабилизаторы), направленных на уменьшение биодоступности тяжелых металлов, а также использование методов фиторемедиации и биорекультивации. Дополнительно целесообразно совершенствование системы управления полигоном, включая контроль фильтрата, повышение эффективности изоляции отходов, создание защитных зеленых зон и инженерных барьеров для ограничения миграции загрязняющих веществ. Проведение информационно-разъяснительной работы с населением о возможных экологических рисках также является важной частью комплексных природоохранных мероприятий.

Список литературы

1. Chuan D., Zhanping L. Contamination and health risks of heavy metals in the soil of a historical landfill in northern China // *Chemosphere*. 2023. Vol. 313. P. 137349. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.137349.
2. Karimian S., Shekoohiyan S., Moussavi G. Health and ecological risk assessment and simulation of heavy metal-contaminated soil of Tehran landfill // *RSC Advances*. 2021. Vol. 11. Is. 14. P. 8080–8095. DOI: 10.1039/D0RA08833A.
3. Thongyuan S., Khantamoon T., Aendob P. Ecological and health risk assessment, carcinogenic and non-carcinogenic effects of heavy metals contamination in the soil from municipal solid waste landfill in Central Thailand // *Human and Ecological Risk Assessment*. 2021. Vol. 27. Is. 2. P. 1–22. DOI: 10.1080/10807039.2020.1786666.
4. Abdrakhmanov T., Jabbarov Z., Atoyeva G., Sayitov S., Cabelkova I., Smutka, L. Changes in the number of volatile components in the soil under the influence of household

waste // *Acta Montanistica Slovaca*. 2023. № 28 (3). P. 535–542. DOI: 10.46544/AMS.v28i3.

5. Tesleem O., Oluwafisayo I., Habib I., Isibor R. A. Contamination, ecological and health risk assessments of potentially toxic elements in soil around a municipal solid waste disposal facility in Southwestern Nigeria // *Journal of Trace Elements and Minerals*. 2023. Vol. 5. P. 100083. DOI: 10.1016/j.jtemin.2023.100083.

6. Wenwu Z., Zeng D., Dean M., Peng Z., Keke C., Qionгда Z., Jing W., Fei X., Guanyi C. Distribution characteristics and potential ecological risk assessment of heavy metals in soils around Shannan landfill site, Tibet // *Environmental Geochemistry and Health*. 2023. Vol. 45. Is. 2. P. 393–407. DOI: 10.1007/s10653-022-01349-y.

7. Bienvenu K. Mavakala, Periyasamy Sivalingam, Amandine Laffite, Crispin K. Mulaji, Gregory Giuliani, Pius T. Mpi-ana, John Poté. Evaluation of heavy metal content and potential ecological risks in soil samples from wild solid waste dumpsites in developing country under tropical conditions // *Environmental Challenges*. Vol. 7. April 2022, 100461. DOI: 10.1016/j.envc.2022.100461.

8. Franklin O., Anthony A., Anthony Y., Karikari K., et al. Assessment of heavy metal contamination in soils at the Kpone landfill site, Ghana: implication for ecological and health risk assessment // *Chemosphere*. 2021. Vol. 282. P. 131007.

9. Shuangchao Wang, Zhiyong Han, Jin Wang, Xiaosong He, Zhiqiang Zhou, Xinran Hu. Environmental risk assessment and factors influencing heavy metal concentrations in the soil of municipal solid waste landfills // *Waste Management*. 15 February 2022. Vol. 139. P. 330–340. DOI: 10.1016/j.wasman.2021.11.036.

10. Daniel A., Chukwuebuka C., Nte J., Chima N. Environmental risk assessment in selected dumpsites in Abakaliki metropolis, Ebonyi State, Southeastern Nigeria // *Environmental Challenges*. 2021. Vol. 4. P. 100143. DOI: 10.1016/j.envc.2021.100143.

11. Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach // *Water Research*. 1980. Vol. 14. P. 975–1001.

12. Maryam Faraji, Ismaeil Alizadeh, Gea Oliveri Conti, Amir Mohammadi. Investigation of health and ecological risk attributed to the soil heavy metals in Iran: Systematic review and meta-analysis // *Science of The Total Environment*. 2023. Vol. 857. Part 1. 158925. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.158925.

13. Joy Tuoyo Adu, Frank Ikechukwu Aneke. Evaluation of heavy metal contamination in landfills from e-waste disposal and its potential as a pollution source for surface water bodies // *Results in Engineering*. 2025. Vol. 25. 104431. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.104431.

14. Shenwen Cai, Shaoqi Zhou, Qinghe Wang, Junwei Cheng, Boping Zeng. Assessment of metal pollution and effects of physicochemical factors on soil microbial communities around a landfill. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2024. Vol. 271. 115968. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2024.115968.

15. Montreemuk J., Rongsayamanont W., Ussawarujikulchai A., Pansak W., Prapagdee B. Evaluation of heavy metal contamination in landfills and role of multi-heavy metal-resistant rhizobacteria in heavy metal mobilization // *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2025. Vol. 22. P. 5893–15908. DOI: 10.1007/s13762-025-06695-9.

16. Honghua Liu, Yuan Wang, Jie Dong, Lixue Cao, Lili Yu, Jia Xin. Distribution Characteristics, Pollution Assessment, and Source Identification of Heavy Metals in Soils Around a Landfill-Farmland Multisource Hybrid District // *Arch Environ Contam Toxicol*. 2021. Vol. 81 (1). P. 77–90. DOI: 10.1007/s00244-021-00857-9.

17. Bienvenu K. Mavakala, Periyasamy Sivalingam., Amandine Laffite., Crispin K., Gregory Giuliani, Pius T. Mpi-ana, Jon Poté. Evaluation of heavy metal content and potential ecological risks in soil samples from wild solid waste dumpsites in developing country under tropical conditions // *Environmental Challenges*. 2022. Vol. 7. 100461. DOI: 10.1016/j.envc.2022.100461.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке Агентства инновационного развития Республики Узбекистан в рамках научно-исследовательского проекта AL-8624042553 «Определение границ санитарно-защитной и фоновой зон вокруг объектов размещения твердых бытовых отходов и разработка экологических показателей состояния почв»

Financing: The research was carried out with the financial support of the Agency for Innovative Development of the Republic of Uzbekistan within the framework of the research project AL-8624042553 “Determining the boundaries of sanitary protection zones and background zones around solid household waste disposal sites and developing ecological indicators of soil condition”.