АННОТАЦИЯ

диссертационного исследования

ПЕРНЕБАЕВА ЖАКСЫЛЫКА ДАУЛЕТБАЕВИЧА

на тему: **«ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА И ПРОГНОЗ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВЫ ПРОДУКТАМИ ПЕРЕРАБОТКИ СВИНЦОВО-ЦИНКОВЫХ ШЛАКОВ»**

представленной на соискание степени доктора философии (PhD) по специальности 8D05210 – «Экология».

Общая характеристика работы. На основе проведения сравнительного анализа мирового опыта геохимического исследования состояния почв, загрязнённых свинцово-цинковыми шлаками с последующим исследованием физико-химических и биологических характеристик загрязнённых почв и свинцово-цинковых шлаков в г.Шымкент с выполнением количественной оценки уровня экологических рисков для здоровья человека, методом Монте-Карло смоделирована вероятность превышения установленных уровней рисков для окружающей среды и оценена чувствительность рассчитанных рисков к изменению количественно-качественных параметров мышьяка.

Диссертационное исследование представлено к защите в форме серии научных статей в соответствии с пунктом 5-1 «Правил присуждения степеней», утверждённых приказом от 31 марта 2011 года №127, с учётом изменений и дополнений, внесённых приказом Министра науки и высшего образования Республики Казахстан от 3 сентября 2026 года №422.

Основанием для выбора данной формы является наличие у соискателя 3 (трех) публикаций в международных рецензируемых научных изданиях, входящих в 1-й и 2-й квартили (Q1, Q2) базы данных Web of Science Core Collection. Совокупность представленных статей образует единое завершённое научное исследование, объединённое общей целью, методологией и объектом исследования.

Соответствие направлениям развития науки или государственным программам.

Диссертационное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития научной и научно-технической деятельности Республики Казахстан «Экология, окружающая среда и рациональное природопользование».

Исследование проводилось в рамках научного проекта AP25795537 «Экологическая оценка мест размещения свинцово-цинковых шлаков на объектах окружающей среды и разработка технологии рекультивации шлаковых отвалов», финансируемого по программе «Жас ғалым» на 2025–2027 годы.

Актуальность диссертационного исследования. Накопление и пространственное распределение тяжёлых металлов и мышьяка в почвах вследствие переработки свинцово-цинковых шлаков представляют собой актуальную экологическую проблему, оказывающую влияние на устойчивость экосистем и экологическую безопасность (Kisiňska et al., 2021; Terzič et al., 2024; Nowiňska et al., 2024, Sun et al., 2025). Существующие научные подходы к оценке загрязнения почв требуют совершенствования в части комплексной интеграции геохимических (Li et al., 2025), биологических показателей и показателей экологического риска, а также учёта неопределённости при оценке рисков (Wang et al., 2025, Jia et al., 2025).

Высокий уровень загрязнения и его пространственная неоднородность, выявленные на территории переработки свинцово-цинковых шлаков в городе Шымкенте, обусловливают научную значимость количественной оценки экологических последствий (Ramazanova et al., 2021). В связи с этим актуальными являются комплексное исследование закономерностей техногенного загрязнения почв, вероятностное прогнозирование экологических рисков и рисков для здоровья человека, а также научное обоснование приоритетных направлений восстановления загрязнённых территорий.

Цель диссертационного исследования - определение уровня загрязнения почв продуктами переработки свинцово-цинковых шлаков и закономерностей его пространственного распределения, комплексная оценка экологических рисков и рисков для здоровья человека на основе геохимических и биоиндикационных методов, а также научное обоснование приоритетных направлений восстановления загрязнённых территорий путём моделирования вероятности превышения установленных пороговых уровней риска.

Задачи исследования:

1. Систематизировать международный научный опыт экологической оценки почв, загрязнённых свинцово-цинковыми шлаками, выявить особенности существующих методологических подходов и недостаточно изученные научные вопросы на основе сравнительного анализа методов геохимического исследования, оценки и прогнозирования экологических рисков.

2. Исследовать химический состав, минералогические и микроструктурные особенности почв и шлаков на территории города Шымкента, подвергшейся воздействию переработки свинцово-цинковых шлаков, установить закономерности пространственного распределения тяжёлых металлов на различных расстояниях от источника загрязнения и оценить эколого-экономический ущерб, обусловленный загрязнением почв.

3. Провести комплексное исследование элементного состава почв и местной растительности на территории переработки свинцово-цинковых шлаков,

выполнить количественную оценку уровня загрязнения почв, экологических рисков и рисков для здоровья человека на основе геохимических показателей загрязнения, определить экологически опасные зоны и научно обосновать приоритетные направления мероприятий по восстановлению загрязнённых территорий.

4. Смоделировать методом Монте-Карло вероятность превышения установленных пороговых уровней канцерогенных и неканцерогенных рисков, обусловленных загрязнением почв тяжёлыми металлами и мышьяком (As) на территории переработки свинцово-цинковых шлаков, выполнить вероятностное прогнозирование уровней риска и оценить чувствительность рассчитанных рисков к изменению токсикологических параметров мышьяка.

Объектом исследования является территория переработки свинцово-цинковых шлаков в городе Шымкенте и прилегающий к ней почвенный покров.

Методология исследования основана на системном и комплексном подходе к экологической оценке. Исследование проводилось по принципу последовательного перехода от научно-методологического анализа к экспериментальным исследованиям, комплексной оценке полученных результатов и вероятностному моделированию.

Отбор проб загрязненной почвы и свинцово-цинковых шлаков проводился согласно требованиям ГОСТ Р 58595-2019, ГОСТ 17.4.3.01-2017, ГОСТ 17.4.4.02-2017.

Элементный анализ образцов проводился в аналитической лаборатории ТОО «КазЭкоАнализ» на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно связанной плазмой (ICP-OES, Shimadzu ICPE-9000) в соответствии с методикой М 02-902-157-10.

Обзор научной литературы выполнен по протоколу PRISMA-ScR (2018): в базах данных Dimensions (n = 351), PubMed (n = 10) и OpenAlex (n = 49) выявлено 410 публикаций за 2010–2025 гг. (дата поиска – 16.03.2026); отбор публикаций проводился на платформе Rayyan, извлечение данных – с помощью Elicit и Microsoft Excel 2021; качество 56 включённых исследований оценено по четырём критериям (число проб ≥ 20; аналитические методы ICP-MS, ICP-OES, AAS или pXRF с контролем качества; наличие фоновых проб; применение стандартизированной системы оценки) (статья 1).

Химический состав и морфология шлаков и почв промышленной зоны г. Шымкент изучены на пробах, отобранных в мае–июне 2024 г. по трансекте на расстояниях 0, 50, 100, 200, 500 и 1000 м от источника загрязнения; пробоподготовка выполнена по ISO 11464:2006 (высушивание при 105 °C, измельчение до 0,1 мм). Содержание Pb, Zn, Cu и Fe определено атомно-абсорбционным методом (ContrAA 300), морфология и фазовое распределение

шлаков – методом сканирующей электронной микроскопии (JSM-6490LV, JEOL), минеральный состав – методом рентгеновской дифракции (XRD); концентрации сопоставлены с ПДК. Эколого-экономический ущерб рассчитан по Правилам экономической оценки ущерба от загрязнения окружающей среды (статья 2).

Комплексная оценка (статья 3) выполнена на 24 пробах почвы, отобранных 24 апреля 2026 г. из слоя 0–50 см по четырём трансектам (север, юг, восток, запад) на расстояниях 0, 1, 5, 10, 50 и 100 м от периметра отвала, двух сравнительных пробах (300 м и 1,5 км) и четырёх сборных пробах надземной массы Centaurea pseudosquarrosa и Plantago lanceolata. Содержание 10 элементов (As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Zn) определено методом ICP-OES (почвы – М 02-902-157-10, растения – ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98; ISO 17294-2, EPA 3050B) с контролем качества по ISO/IEC 17025 (холостые пробы, стандартные образцы, извлечение 80–120%). Загрязнение почв оценено по шести геохимическим индексам относительно кларков верхней континентальной коры – CF, Igeo, EF, PLI, mCd и RI (по Хакансону), переход металлов в растения – по отношению Сраст/Спочв, экологический риск – по коэффициенту RCR = PEC/PNEC (REACH), риск для здоровья человека – по модели US EPA RAGS (пероральный, ингаляционный и дермальный пути поступления; CDI, HQ, HI, CR); для пространственного анализа выделены буферные зоны 200, 500 и 1000 м.

Вероятностная оценка риска (статья 4) выполнена на данных 24 трансектных проб для восьми элементов (Pb, Zn, Cd, Cu, As, Hg, Ni, Cr) применительно к взрослому работнику на открытой территории: распределения концентраций аппроксимированы логнормальным законом (метод максимального правдоподобия), параметры экспозиции заданы стохастическими распределениями; моделирование методом Монте-Карло проведено в 100 000 итераций (генератор PCG64) для двух наборов токсикологических параметров мышьяка – исходного (фактор наклона 1,5 $(мг/кг·сут)^{-1}$) и обновлённого IRIS 2025 г. (32 $(мг/кг·сут)^{-1}$; RfD $6{,}0 \times 10^{-5}$ мг/кг·сут); рассчитаны вероятности превышения пороговых значений канцерогенного риска (10^{-6}, 10^{-4}, 10^{-3}) и индекса опасности (HI = 1 и 10).

Статистическая обработка данных включала описательную статистику (среднее ± стандартное отклонение), корреляционный анализ Пирсона ($p < 0{,}05$) – для концентраций тяжёлых металлов (статья 2), однофакторный дисперсионный анализ (one-way ANOVA) с апостериорным критерием Тьюки (HSD, $\alpha = 0{,}05$) – для различий между трансектами (статья 3), проверку нормальности по критерию Шапиро–Уилка и ранговую корреляцию Спирмена для анализа чувствительности (статья 4). Расчёты выполнены в среде Python 3.11 (pandas, NumPy, SciPy).

Все измерения проводились не менее, чем в трех повторностях.

Научная новизна полученных результатов:

1. На основе систематизации мирового опыта в области научно-методологических подходов к экологической оценке почв, загрязнённых свинцово-цинковыми шлаками, проведен сравнительный анализ и установлено, что систематическое картографирование с применением методов оценки состояния почв, загрязненных шлаками, не существует, а данные по Центральной и Средней Азии, включая Казахстан, полностью отсутствуют. Критические пробелы связаны с ограничением прогностического моделирования и отсутствием стандартизированных протоколов. Результаты исследования представлены в обзорно-аналитической статье (*Sustainability*, 2026, 18, 3934).

2. Уточнены геохимические характеристики свинцово-цинковых шлаков и загрязненных почв в городе Шымкент с установлением особенностей пространственного распределения тяжёлых металлов и проведением количественной оценки эколого-экономического ущерба, обусловленного загрязнением почв. Выявленная сильная положительная корреляция между концентрациями тяжелых металлов указывает на их общее антропогенное происхождение и одновременную миграцию в почвенном профиле. Общий экологический ущерб превышает 750 миллионов тенге в год, при этом наибольший вклад в общий ущерб вносят железо и свинец. Результаты опубликованы в экспериментальной исследовательской статье (*Engineering, Technology & Applied Science Research*, 2026, 16(3), 36790–36795).

3. На основе интеграции геохимических индексов загрязнения, данных об элементном составе растений и показателей экологического риска выполнена комплексная оценка загрязнения почв, обоснован подход к выделению экологически опасных зон и определению трёх уровней приоритетности мероприятий по восстановлению загрязнённых территорий. Было установлено, что пиковые концентрации во много раз превышают предельно допустимую концентрацию в Казахстане. Разработана трёхуровневая система рекультивации с этапами инженерной изоляции, фитостабилизации, контролируемого снижения концентрации, которая сочетает в себе восстановление ресурсов и контроль загрязнения и может быть тиражирована на аналогичных территориях. Результаты опубликованы в журнале *Sustainability* (2026, 18, 6742).

4. На основе вероятностного моделирования методом Монте-Карло количественно определена вероятность превышения установленных пороговых уровней канцерогенного и неканцерогенного рисков и оценена чувствительность результатов оценки риска к обновлённым токсикологическим параметрам мышьяка. При этом, вероятность превышения порога канцерогенности 10^{-4} составляла 69,9 %, а вероятность превышения HI = 1 — 82,1 %; средние значения и наихудшие показатели, указанные на сайте, соответствовали 76,9-му и 97,2-му процентилям смоделированного распределения. По данным 2025 года средний

риск был в 21 раз выше, а вероятность превышения — 99,3 % и 97,3 % соответственно. Было установлено, что концентрация мышьяка (ρ = +0,867) является ограничивающим фактором для точности при любой параметризации. Результаты опубликованы в журнале *Toxics* (2026, 14, 894).

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Загрязнение почв тяжёлыми металлами на территории переработки свинцово-цинковых шлаков характеризуется пространственной неоднородностью и изменяется в зависимости от расстояния до источника загрязнения.

2. Повышенные концентрации тяжёлых металлов и мышьяка в почвах прямо коррелируют с увеличением уровня геохимического загрязнения и повышением рисков для экосистем и здоровья человека.

3. Приоритетность мероприятий по восстановлению загрязнённых территорий определяется на основе комплексного учёта степени геохимического загрязнения и уровней экологического риска.

4. Вероятность превышения установленных пороговых уровней канцерогенного и неканцерогенного рисков для здоровья человека зависит от установленных токсикологических параметров мышьяка, изменение которых существенно влияет на результаты оценки риска.

Практическая значимость результатов исследований.

По результатам проведённых исследований эколого-экономический ущерб, обусловленный загрязнением почв тяжёлыми металлами на территории переработки свинцово-цинковых шлаков в городе Шымкенте, оценён в размере более 750 млн тенге в год.

На основе комплексного анализа геохимических показателей загрязнения и уровней экологического риска научно обоснована трёхуровневая система приоритетности мероприятий по восстановлению загрязнённых территорий что может быть рекомендовано для применения в экологических и природоохранных организациях.

Использование вероятностного моделирования методом Монте-Карло устаановило, что использование обновлённых токсикологических параметров мышьяка изменяет расчётную вероятность превышения установленного порогового уровня канцерогенного риска с 70 % до 99 %, а неканцерогенного риска — с 82 % до 97 %. Полученные результаты могут быть использованы контролирующими организациями при оценке рисков для здоровья человека.

Результаты диссертационного исследования могут быть использованы в образовательном процессе для студентов и магистрантов, обучающихся по специальности «Экология».

Практическое применение отдельных результатов исследования подтверждается актом внедрения 2023 года и актом апробации 2024 года ТОО «Центр экологического сопровождения и экспертизы».

Апробация результатов исследований: основные результаты исследований были представлены на VII международной научно-практической конференции «Quality Management: Search and Solutions (Houston, USA, 2021), IX международной научно-практической конференции “Industrial Technologies and Engineering” ICITE-2022 (Шымкент, Казахстан, 2022), в рецензируемом журнале «Productive forces and nstural resourses of Georgia” (Tbilisi, Georgia, 2022), международной научно-практической конференции «Ауэзовские чтения- 20» (Шымкент, Казахстан, 2022), X международной научно-практической конференции «Innovation Management and Technplpgy in the Era of Glabalization” (Manchester, UK, 2023), в научном журнале «Auezov University”, №2(10), (Шымкент, Казахстан, 2024), в международном научном журнале «Вестник науки», №9(78) (Тольятти, Россия, 2024), на международной научно-практической конференции “Environmental protection and Sustainable development” (Tbilisi, Georgia, 2024), в рецензируемом журнале «International Journal of Innovative Research and Scientific Studies» (2025), LXX международной научно-практической конференции “Advances in Science and Technology» (Москва, Россия, 2025).

Диссертационная работа включает следующие публикации:

1. **Pernebayev Z.,** Aitimbetova G. Scoping Review on Soil Contamination from Pb–Zn Slag and Environmental Assessment Methods // Sustainability. – 2026. – Vol. 18. – Article 3934. DOI: 10.3390/su18083934.

(Вклад соискателя – соискатель инициировал обзорное исследование, подготовил его основную часть, провёл систематический анализ научной литературы, выполнил сравнительный анализ существующих методов экологической оценки загрязнения почв свинцово-цинковыми шлаками и научное обобщение полученных результатов.)

2. **Pernebayev Z.,** Aitimbetova G., Abubakirova A. Integrated Geochemical, Vegetation, and Risk Assessment of a Pb–Zn Slag Reprocessing Site in Southern Kazakhstan: Implications for Sustainable Remediation Prioritization // Sustainability. – 2026. – Vol. 18. – Article 6742. DOI: 10.3390/su18136742.

(Вклад соискателя – соискатель внёс основной вклад в анализ показателей геохимического загрязнения, оценку экологических рисков и научное обоснование приоритетных направлений восстановления загрязнённых территорий, а также предложил экологические решения, направленные на снижение выявленных рисков.)

3. **Pernebayev Z.,** Issayeva A., Baiduisenova T., Ansari M.-u.-R., Aitimbetova A., Nurseiit K. Exceedance Probability and Toxicity-Value Sensitivity in Health-Risk Assessment of a Pb–Zn Slag Reprocessing Site Under the 2025 IRIS Arsenic Values // Toxics. – 2026. – Vol. 14, №10. – Article 894. DOI: 10.3390/toxics14100894.

(Вклад соискателя – соискатель участвовал в формировании научной концепции исследования, разработке методики вероятностной оценки рисков, анализе результатов моделирования методом Монте-Карло и научном обосновании полученных выводов.)

Охранные документы, полученные в рамках диссертационного исследования.

По теме диссертационного исследования получены следующие свидетельства о государственной регистрации объектов авторского права:

1. Свидетельство о внесении в государственный реестр объектов, охраняемых авторским правом, №56867 (15.04.2025 г.) – The influence of lead-zinc wastes on the formation of phytocenoses.

(Вклад соискателя – соискатель участвовал в исследовании влияния свинцово-цинковых отходов на формирование фитоценозов, анализе научных данных и обобщении полученных результатов.)

2. Свидетельство о внесении в государственный реестр объектов, охраняемых авторским правом, №57022 (22.04.2025 г.) – «Влияние загрязнения почвы ионами свинца и кадмия на формирование фитоценозов загрязненных территорий».

(Вклад соискателя – соискатель участвовал в анализе влияния загрязнения почв ионами свинца и кадмия на формирование фитоценозов, научной интерпретации результатов, формулировании выводов, а также в подготовке материалов для регистрации объекта авторского права.)

Структура диссертационной работы, представленной в виде серии статей.

Диссертационная работа представлена в виде серии из четырёх научных статей, опубликованных соискателем в соавторстве в журналах базы Web of Science (Q1, Q2) и охранных документов на объекты интеллектуальной собственности. В указанных работах последовательно изложены и обоснованы основные научные положения диссертации, подтверждённые результатами экспериментальных исследований, геохимического анализа и математического моделирования.