

ЭКОЛОГИЯ ПОЧВ

MPNТИ 87.21.09

DOI: 10.51886/1999-740X_2026_3_32

Р.Х. Рамазанова^{1*}, А.С. Вырахманова^{1*}, М.К. Жумагулова¹, С.Н. Дуйсеков¹,А.Д. Газизов¹, Д.Л. Дауров², Ж.Б. Сунатуллаев³**ТЕХНОГЕННОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПОЧВ ВОСТОЧНОГО КАЗАХСТАНА ТЯЖЁЛЫМИ
МЕТАЛЛАМИ: ОЦЕНКА ФОРМ, ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА И
ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ**¹ТОО «Казахский научно-исследовательский институт почвоведения и агрохимии им.У.У. Успанова», 050060, Алматы, пр. аль-Фараби, 75В, Казахстан,

*e-mail: raushasoil88@mail.ru, asem-v80@mail.ru

²РГП на ПХВ «Институт биологии и биотехнологии растений»,

050040, Алматы, ул. Тимирязева, 45, Казахстан

³НАО «Казахский национальный аграрный исследовательский университет»,
050010, Алматы, пр. Абая, 8, Казахстан

Аннотация. Техногенное загрязнение почв тяжёлыми металлами является одним из ключевых факторов экологического риска в промышленных регионах Восточно-Казахстанской области. В работе представлена комплексная оценка агроэкологического состояния почв в зонах влияния горнометаллургических предприятий с анализом валовых и подвижных форм потенциально токсичных элементов. Обследование охватило 28 121 га вблизи крупных промышленных объектов. Определены агрохимические и физико-химические свойства почв, а также содержание Pb, Zn, Cu и Cd. Рассчитаны интегральные показатели загрязнения и экологического риска, выполнено пространственное зонирование. Установлено, что максимальная аккумуляция металлов приурочена к верхним горизонтам почвы и зонам влияния промышленных выбросов. Наиболее опасными элементами являются свинец и кадмий, при этом кадмий характеризуется высокой токсичностью и мобильностью. Полученные результаты формируют основу для экологического зонирования и разработки систем мониторинга и ремедиации.

Ключевые слова: тяжёлые металлы, почвы, Восточный Казахстан, загрязнение, подвижные формы, экологический риск, ГИС.

ВВЕДЕНИЕ

Почвенный покров является одним из наиболее уязвимых компонентов природной среды в условиях интенсивного промышленного освоения территорий. В отличие от атмосферного воздуха и поверхностных вод, почвы обладают выраженной аккумуляционной способностью и выступают долгосрочным депо загрязняющих веществ, что обуславливает инерционность восстановления и повышенные риски вторичного загрязнения [1, 2].

Восточно-Казахстанская область относится к индустриально развитым регионам Казахстана и характеризуется высокой концентрацией горно-обогати-

тельных и металлургических производств. В таких условиях диагностика загрязнения требует учёта не только валового содержания металлов, но и доли подвижных форм, определяющих миграционную способность и потенциальную биодоступность элементов [3].

Почвенный покров Восточно-Казахстанской области испытывает значительную антропогенную нагрузку, формирующую устойчивый поток пыле-газовых загрязнений. При этом существенная часть выбросов распространяется на прилегающие сельскохозяйственные территории, что создаёт риск накопления тяжёлых металлов в агроландшафтах и последующего вовлече-

ния их в трофические цепи. Поэтому оценка валового содержания тяжёлых металлов и их подвижных форм, которые определяют степень биодоступности элементов и их способность к миграции в системе «почва–растение» является безусловно важной. Из тяжёлых металлов подвижные формы Cd, Zn и Cu являются наиболее информативными показателями техногенного воздействия и потенциального экологического риска, особенно в условиях изменения кислотно-щелочного состояния почв и снижения содержания органического вещества.

В ряде работ подчёркивается необходимость использования интегральных индексов загрязнения и методов пространственного анализа для выявления локальных «горячих точек» и ранжирования территорий по уровню риска [4-8].

Несмотря на наличие отдельных исследований, для техногенно напряженных зон Восточного Казахстана сохраняется научно-прикладной пробел в наличии сопоставимых мониторинговых данных, объединяющих единый перечень определяемых показателей, профильную оценку распределения ТМ по слоям почвы и пространственное картографирование загрязнения в привязке к конкретным промышленным источникам [9].

Цель исследования – оценить степень загрязнения и пространственно-профильное распределение подвижных форм Pb, Zn, Cu и Cd в почвах зон потенциального влияния промышленных объектов Восточно-Казахстанской области, включая прилегающие сельскохозяйственные угодья, и провести сравнительную оценку экологического риска.

Научная новизна исследования заключается в формировании единого массива данных по территориям, прилегающим к семи промышленным объектам Восточно-Казахстанской области,

включающего результаты определения подвижных форм Pb, Zn, Cu и Cd, оценку их вертикального и пространственного распределения, расчёт индексов загрязнения и потенциального экологического риска, а также картографирование подвижных форм металлов. Применённый подход обеспечивает сопоставимость результатов между обследованными территориями и позволяет выделить участки, требующие первоочередного почвенно-экологического мониторинга.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования являлись почвы территорий, прилегающих к промышленным объектам Восточно-Казахстанской области, включая сельскохозяйственные угодья. Маршрутное обследование проводилось в 2024–2025 гг. на территории общей площадью 28 121 га.

Сеть точек отбора формировали с учётом пространственной неоднородности почвенного покрова, характера землепользования, расположения промышленных объектов, направления господствующих ветров и особенностей рельефа. При выборе точек особое внимание уделяли участкам, расположенным в предполагаемых направлениях переноса пылегазовых выбросов, а также понижениям рельефа, в которых возможно локальное накопление загрязняющих веществ (рисунок 1).

В 2024 году обследовано 133 точки, в 2025 году – 77, всего за указанный период – 210 точек. В разрезе обследованных территорий количество точек составило: в районе Риддерского металлургического завода – 26 и 8 соответственно, Николаевской обогатительной фабрики – 15 и 10, Иртышской редкоземельной компании – 19 и 11, Иртышского медеплавильного завода – 22 и 15, Белоусовского горно-обогатительного комбината – 17 и 14, Усть-Каменогорского титано-магниевого комбината – 16 и 9, Ульбинского металлургического завода – 18 и 10 точек.

Из общего числа 210 обследованных точек 77 расположены на пахотных угодьях, 133 – на иных обследованных территориях. Местоположение точек фиксировали средствами спутниковой навигации в системе координат WGS 84 (EPSG:4326).

Для определения содержания тяжёлых металлов и оценки их вертикального распределения почвенные пробы отбирали из слоёв 0–5, 5–20 и 20–50 см. В каждой точке из каждого слоя отбирали одну индивидуальную почвенную пробу.

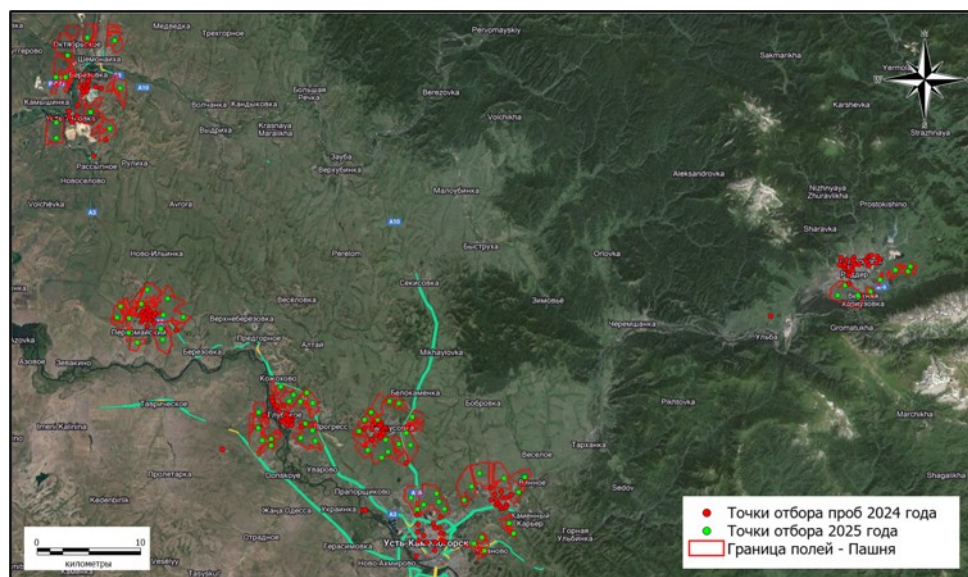


Рисунок 1 – Схема расположения точек отбора почвенных проб в зонах влияния промышленных объектов Восточно-Казахстанской области в 2024–2025 гг.

Полевые повторности в пределах одной точки не предусматривались, поскольку каждая точка являлась самостоятельной единицей пространственного наблюдения маршрутного обследования. При отборе всех трёх слоёв в 210 точках фактическое количество почвенных проб составляло 630. Фоновый участок выбран на пахотных угодьях ТОО «Восточно-Казахстанская сельскохозяйственная опытная станция» в Глубоковском районе Восточно-Казахстанской области, координаты 50.03683137°N 82.59759025°E. Участок расположен на расстоянии 5 км от ближайшего промышленного объекта, вне зоны непосредственного воздействия промышленных выбросов, автомобильных дорог с интенсивным движением, мест складирования отходов и других выявленных локальных источ-

ников загрязнения. Почвенный покров представлен тёмно-каштановыми легкосуглинистыми почвами. На участке отобрано 12 почвенных проб. Выбор фонового участка был обусловлен однородностью почвенного покрова, отсутствием установленных локальных источников загрязнения и сопоставимостью почвенных условий с обследованными тёмно-каштановыми пахотными почвами.

Отбор и подготовку почвенных проб проводили в соответствии с ГОСТ 17.4.3.01-2017 «Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб» и ГОСТ 17.4.4.02-2017 «Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа». Полевые исследования включали рекогносцировочное обследование, ана-

лиз картографических и спутниковых материалов, описание условий расположения точек, их координатную фиксацию и отбор почвенных проб.

Для построения карт использовался метод пространственной интерполяции данных с последующей классификацией значений по установленным градациям, по принципу ближайшей точки. Для оценки вариабельности показателей использовались статистические методы, включая расчёт коэффициентов вариации и средних значений с учётом доверительных интервалов.

Физико-химическая и агрохимическая характеристика почвы фонового участка проводилась отдельно для слоёв 0–20 и 20–40 см, соответствующих пахотному и подпахотному горизонтам для общей характеристики почвенных условий и не включалась в оценку содержания тяжёлых металлов.

Определение физико-химических и агрохимических показателей почвы включало: сумму поглощённых оснований (по Каппену), карбонаты (по Е.В. Аринушкиной в модификации П.Г. Грабарова), pH потенциометрически, гранулометрический состав (по Качинскому), органическое вещество по ГОСТ 26213-84, легкогидролизуемый азот (по Тюрину и Кононовой), подвижные формы фосфора и калия (по Мачигину, ЦИНАО).

Подвижные формы тяжёлых металлов Cu, Zn, Cd и Pb определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии на приборе AA – 6200 фирмы «Shimadzu» (Япония). В качестве экстрагента использовали ацетатно-аммонийный буферный раствор (pH 4,8) при соотношении почва: раствор 1:10. Полученные уровни оценивали по группировке И.Г. Важенина, включающей фоновый, слабый, умеренный, средний, повышенный, высокий и очень высокий уровни [10]. Данная группировка применялась как сравнительная шкала, её

градации не рассматривались в качестве предельно допустимых концентраций.

Содержание элементов определяли по резонансным линиям при длинах волн 324,7; 213,8; 228,8 и 283,3 нм соответственно. Градуировочные графики строили по стандартным растворам: для Cu, Zn и Pb – 0,5; 1,0 и 2,0 мг/л, для Cd – 0,1; 0,25 и 0,5 мг/л. В качестве холостой пробы использовали ацетатно-аммонийный буфер (pH 4,8), в качестве контрольного раствора – раствор Cu с концентрацией 2,0 мг/л. Каждые 10 проб выполняли параллельное определение дубликата.

Потенциальный экологический риск загрязнения почв оценивали с использованием адаптированного метода Хокансона [11]. Расчёты выполняли отдельно для каждой пробы по содержанию подвижных форм Zn, Cu, Cd и Pb. Коэффициент загрязнения определяли по формуле:

$$C_f^i = \frac{C_i}{C_0^i},$$

где C_i – содержание подвижной формы i -го металла в пробе, мг/кг; C_0^i – принятое референтное содержание: Zn – 22,0; Cu – 1,5; Cd – 2,0 и Pb – 1,2 мг/кг.

Индивидуальный коэффициент потенциального экологического риска рассчитывали по формуле:

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i,$$

где коэффициенты токсического отклика T_r^i составляли 1 для Zn, 5 для Cu и Pb и 30 для Cd. Суммарный индекс определяли по формуле:

$$RI = E_r^{Zn} + E_r^{Cu} + E_r^{Cd} + E_r^{Pb}.$$

Значения E_r^i классифицировали следующим образом: <40 – низкий, 40–<80 – умеренный, 80–<160 – значительный, 160–<320 – высокий и ≥320 – очень высокий риск. Для RI использовали градации: <150 – низкий, 150–<300 – умеренный, 300–<600 – значительный и ≥600 – очень высокий риск.

Результаты группировали по слоям 0-5, 5-20 и 20-50 см и представляли как медиану, межквартильный диапазон Q1-Q3 и диапазон «min-max». Дополнительно рассчитывали процент образцов в каждой категории RI.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Физико-химические показатели почвы могут способствовать сорбции и закреплению тяжёлых металлов. Вместе

с тем фактическая подвижность элементов определяется совокупностью свойств почвы и химическими особенностями каждого металла [12, 13]. Темно-каштановая легкосуглинистая почва фонового участка характеризовалась слабощелочной реакцией среды 8,09 и 8,17. Содержание гумуса с глубиной снижалось с 3,08 до 2,67% (таблица 1).

Таблица 1 – Физико-химические и агрохимические показатели темно-каштановой почвы фонового участка

Показатель	Слой почвы, см	
	0-20	20-40
Гумус, %	3,08 ± 0,07	2,67 ± 0,09
Легкогидролизующий N, мг/кг	68,48 ± 2,05	60,67 ± 1,43
Подвижный P ₂ O ₅ , мг/кг	27,58 ± 1,47	17,08 ± 0,88
Обменный K ₂ O, мг/кг	527,08 ± 8,65	396,67 ± 16,87
pH	8,09 ± 0,03	8,17 ± 0,02
CO ₂ карбонатов, %	4,64 ± 0,23	5,15 ± 0,29
Поглощенный Ca, мг-экв/100 г почвы	16,60 ± 0,17	16,33 ± 0,31
Поглощенный Mg, мг-экв/100 г почвы	3,30 ± 0,30	3,24 ± 0,29
Поглощенный Na, мг-экв/100 г почвы	0,060 ± 0,006	0,056 ± 0,006
Поглощенный K, мг-экв/100 г почвы	0,36 ± 0,01	0,13 ± 0,02
Физическая глина, %	28,63±4,24	36,43±4,14

Примечание – представлены средние значения и их стандартные ошибки; n=24 для каждого слоя.

Содержание легкогидролизующего азота, подвижного фосфора и обменного калия характеризует почвы как высоко и среднеобеспеченные. В составе поглощенных катионов преобладали кальций – 16,60 и 16,33 мг-экв/100 г почвы соответственно по слоям. Содержание поглощенного натрия – низкое. Доля частиц физической глины составила 28,63-36,43%, что соответствует легкосуглинистому гранулометрическому составу.

Содержание подвижных форм Zn, Cu, Cd и Pb в темно-каштановых пахотных почвах характеризовалось выраженной пространственной изменчивос-

тью, степень которой различалась в зависимости от элемента и глубины отбора (таблица 2).

Наибольшая пространственная вариабельность установлена для подвижной формы Zn. Коэффициент вариации составлял 140,9% в слое 0-5 см и 173,4% в слое 5-20 см при диапазонах содержания 1,2-112,0 и 0,7-153,0 мг/кг соответственно. В слое 20-50 см среднее содержание Zn снижалось до 5,0 мг/кг, а коэффициент вариации – до 88,8%. Высокие значения коэффициента вариации и широкие диапазоны свидетельствуют о выраженной пространственной неоднородности и наличии

локальных участков повышенного содержания цинка.

Среднее содержание подвижной формы Cu снижалось с 2,5 мг/кг в слое 0–5 см до 2,1 мг/кг в слое 20–50 см. В верхних двух слоях отмечалась высокая пространственная изменчивость: коэффициенты вариации составляли 111,8 и 116,7% соответственно.

Среднее содержание подвижной формы Cd составляло 1,7, 1,6 и 1,5 мг/кг соответственно в слоях 0–5, 5–20 и 20–50 см. Коэффициент вариации находился в пределах 42,6–47,2%, что указывает на меньшую пространственную изменчивость содержания Cd в пределах от-

дельных слоёв по сравнению с Zn и Cu. Незначительные различия между средними значениями свидетельствуют о слабо выраженной профильной дифференциации подвижного Cd.

Среднее содержание подвижной формы Pb составляло 2,4 мг/кг в слоях 0–5 и 5–20 см и 2,2 мг/кг в слое 20–50 см.

Коэффициент вариации изменялся от 54,3 до 62,3%. Незначительное уменьшение средних значений с глубиной не позволяет сделать однозначный вывод о преимущественной аккумуляции Pb только в поверхностном слое без анализа сопряжённых данных по отдельным точкам.

Таблица 2 – Вариационно-статистические показатели содержания подвижных форм тяжёлых металлов в слоях пахотных темно-каштановых почв, мг/кг

Металлы	Слои почвы, см	n	M±m	Q1-Q3	V, %
Zn	0-5 см	77	10,5±1,7	1,2÷112,0	140,9
Cu		77	2,5±0,3	0,6÷20,1	111,8
Cd		77	1,7±0,1	0,6÷3,4	43,2
Pb		77	2,4±0,2	0,3÷7,6	62,3
Zn	5-20 см	77	10,8±2,14	0,7÷153,0	173,4
Cu		77	2,4±0,32	0,4÷20,4	116,7
Cd		77	1,6±0,08	0,3÷3,8	42,6
Pb		77	2,4±0,17	0,3÷7,3	60,3
Zn	20-50 см	77	5,0±0,50	0,7÷22,3	88,8
Cu		77	2,1±0,20	0,7÷12,4	81,4
Cd		77	1,5±0,08	0,3÷3,5	47,2
Pb		77	2,2±0,14	0,3÷8,6	54,3

Примечание – n – число обследованных точек на пахотных угодьях; M – среднее арифметическое; m – стандартная ошибка среднего; Q1-Q3 – межквартильный интервал (пределы колебания); V – коэффициент вариации. Показатели рассчитаны отдельно для каждого слоя почвы.

Среднее содержание подвижной формы Zn соответствовало умеренному уровню в слоях 0–5 и 5–20 см и слабому уровню в слое 20–50 см. Средние концентрации подвижной формы Cu во всех исследованных слоях соответствовали умеренному уровню. Содержание подвижного Cd во всех слоях характеризовалось высоким уровнем, а содержание Pb – средним уровнем в слоях 0–5 и 5–20 см и умеренным уровнем в слое 20–50 см.

Оценка по средним значениям не отражает выраженной неоднородности

обследованных территорий. Диапазоны содержания Zn, Cu и Pb охватывали градации от фонового до очень высокого уровня, а Cd – от умеренного до очень высокого уровня.

Таким образом, наиболее выраженная пространственная неоднородность была характерна для цинка и меди. Кадмий и свинец отличались меньшей вариабельностью в пределах отдельных слоёв и слабо выраженной профильной дифференциацией средних значений.

С учётом широких диапазонов и высоких коэффициентов вариации средние значения следует рассматривать совместно с медианами, межквартильными интервалами и распределением проб по установленным градациям содержания. По средним значениям наиболее выраженная профильная дифференциация установлена для подвижной формы Zn: в слоях 0–5 и 5–20 см содержание элемента было сопоставимым, тогда как в слое 20–50 см оно уменьшалось более чем в два раза. Для Cu и Cd отмечалось постепенное снижение средних значений с глубиной. Содержание Pb в слоях 0–5 и 5–20 см было

одинаковым и незначительно уменьшалось в слое 20–50 см. Пространственное распределение подвижных форм металлов в поверхностном слое 0–5 см представлено на рисунке 2.

Картографические материалы показывают мозаичный характер распределения подвижных форм тяжёлых металлов. В пределах обследованных территорий выявлены локальные участки, отнесённые к более высоким картографическим классам содержания металлов. Пространственная конфигурация этих участков различалась в зависимости от элемента и обследуемой территории.

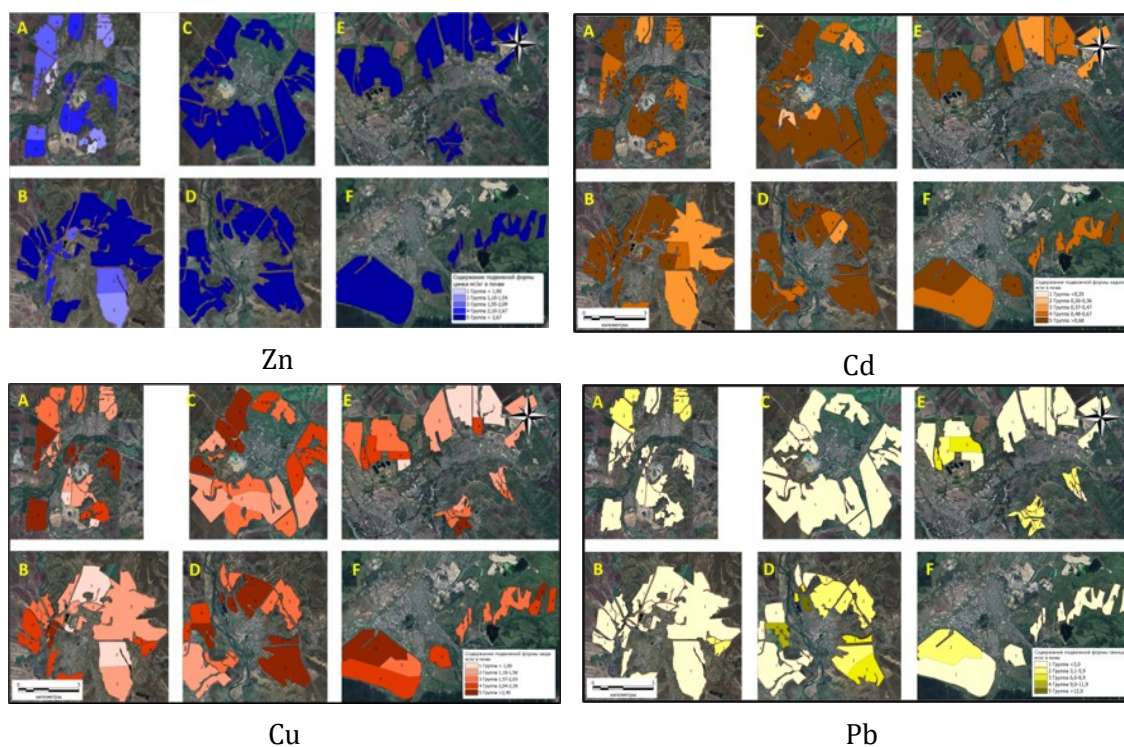


Рисунок 2 - Пространственное распределение подвижной формы тяжелых металлов в слое почвы 0–5 см по объектам: А – Николаевская обогатительная фабрика, В – Иртышская редкоземельная компания, С – Иртышский медеплавильный завод, D – Белоусовский горно-обогатительный комбинат, Е – Ульбинский металлургический завод и Титано-магниевого комбинат, F – Риддерский металлургический завод

Расположение отдельных участков с повышенными концентрациями в пределах зон потенциального влияния промышленных объектов согласуется с предположением о техногенном поступлении металлов. Вместе с тем пространственное совпадение само по себе не позволяет однозначно установить источник загрязнения. На распределение подвижных форм металлов могли также влиять направление переноса пылевых выбросов, особенности рельефа, характер землепользования, транспортная нагрузка и природная неоднородность почвенного покрова. Полученные карты следует рассматривать как инструмент выделения участков первоочередного мониторинга, а не как самостоятельное доказательство происхождения загрязнения.

Для интегральной оценки степени техногенного воздействия были рассчитаны коэффициент загрязнения (Cf),

коэффициент потенциального экологического риска отдельного элемента (E_r) и суммарный индекс экологического риска (RI). Интегральные показатели, представленные в таблице 3, свидетельствуют о формировании в пределах промышленной зоны г. Риддера очень высокого уровня экологического риска. Результаты показывают выраженное уменьшение риска с глубиной: доля образцов с $RI \geq 600$ снижается с 41,18% в слое 0–5 см до 8,82% в слое 20–50 см. Это указывает на преимущественное накопление подвижных форм тяжёлых металлов в поверхностном слое почвы.

Анализ индивидуальных коэффициентов потенциального экологического риска по объединённым данным 2024–2025 гг. показал, что в поверхностном слое 0–5 см наибольшее медианное значение E_r^i установлено для Cd – 156,00, далее следовали Pb – 77,29, Cu – 33,83 и Zn – 25,82.

Таблица 3 – Распределение значений суммарного индекса потенциального экологического риска (RI) по слоям почвы и категориям риска в промышленной зоне (на примере Риддерского металлургического завода)

Слой, см	n	Медиана RI	Q1-Q3	min-max	RI < 150, %	150–<300, %	300–<600, %	RI ≥ 600, %
0-5	34	385,91	57,40 – 1759,22	25,45 – 8739,85	38,24	8,82	11,76	41,18
5-20	34	189,55	41,60 – 719,03	21,16 – 6787,12	47,06	14,71	8,82	29,41
20-50	34	123,69	42,53 – 324,84	20,92 – 6430,11	52,94	14,71	23,53	8,82

С увеличением глубины медианные значения риска всех исследованных металлов снижались. В слое 20–50 см медианные значения E_r^i составили 42,00 для Cd, 29,38 для Pb, 9,50 для Zn и 8,83 для Cu. Одновременно медиана суммарного индекса RI уменьшилась с 385,91 в слое 0–5 см до 123,69 в слое 20–50 см. Полученные результаты свидетельствуют о преимущественном накоплении подвижных форм тяжёлых метал-

лов в поверхностном слое почвы и о ведущем вкладе Cd в формирование типичного уровня потенциального экологического риска. Значительное превышение максимальных значений над медианными, особенно для Pb и Cu, указывает на пространственную неоднородность загрязнения и наличие отдельных локальных участков с экстремально высоким уровнем риска (таблица 4).

Таблица 4 – Распределение индивидуального потенциального экологического риска тяжёлых металлов (E_r^i) по слоям почвы в зоне влияния Риддерского металлургического завода

Металлы	0–5 см медиана (Q1–Q3)	0–5 см, min–max	5–20 см, медиана (Q1–Q3)	5–20 см, min–max	20–50 см, медиана (Q1–Q3)	20–50 см, min–max
Zn	25,82 (1,32–83,74)	0,22 – 200,68	11,52 (0,90 – 63,56)	0,17 – 192,95	9,50 (0,41 – 31,94)	0,08 – 174,27
Cu	33,83 (7,50 – 219,92)	2,67 – 3923,33	21,00 (5,75 – 133,92)	1,67 – 3156,67	8,83 (6,67 – 37,75)	2,33 – 1513,33
Cd	156,00 (29,25 – 667,50)	13,50 – 2685,00	67,50 (23,25 – 222,38)	6,00 – 2400,00	42,00 (21,00 – 115,88)	6,00 – 930,00
Pb	77,29 (10,10 – 455,21)	3,75 – 8316,67	32,50 (9,69 – 123,44)	2,92 – 2850,00	29,38 (7,71 – 67,71)	3,33 – 6041,67

Примечание: Данные представлены как медиана (Q1–Q3) и диапазон минимальных и максимальных значений; для каждого металла и слоя $n=34$

Выявленное снижение значений E_r^i и RI с глубиной характерно для аэротехногенного загрязнения: металл-содержащие частицы промышленных выбросов преимущественно осаждаются на поверхности почвы, а затем частично мигрируют в нижележащие горизонты под влиянием почвенно-химических и гидрологических процессов [14].

Полученные результаты также согласуются с данными других исследований техногенных территорий, где показано, что верхние гумусовые горизонты выступают основным аккумулятором тяжёлых металлов, тогда как глубинные горизонты отражают интегральный эффект длительного воздействия и миграционных процессов [15].

Пространственный анализ распределения тяжёлых металлов позволил выявить выраженную мозаичность загрязнения и наличие локальных «горячих точек». Для ряда объектов выявлена асимметрия ареолов загрязнения, обусловленная направлением господствующих ветров, особенностями рельефа и гидрографической сети. Это подтверждает необходимость учёта пространственных факторов при экологи-

ческой оценке почв и планировании мониторинга. Полученные карты могут рассматриваться как основа для экологического зонирования территорий и приоритизации природоохранных мероприятий.

Практическое значение полученных результатов заключается в возможности использования выявленных закономерностей для оптимизации системы мониторинга почв, разработки мероприятий по снижению техногенной нагрузки и рационального использования сельскохозяйственных земель. Выделение зон повышенного экологического риска позволяет целенаправленно планировать природоохранные мероприятия и минимизировать потенциальные последствия загрязнения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Почвы Восточно-Казахстанской области в зонах влияния промышленных объектов характеризуются выраженной техногенной трансформацией. Максимальная аккумуляция загрязняющих элементов приурочена к верхним горизонтам почвы, что указывает на преимущественно атмосферный путь поступления поллютантов. На примере

почв территорий, прилегающих к Риддерскому металлургическому заводу, выявлено, что медиана суммарного индекса экологического риска (RI) с глубиной снижается с 385,91 (в слое 0–5 см) до 123,69 (в слое 20–50 см), а доля образцов с очень высоким риском ($RI \geq 600\%$) сокращается с 41,18% до 8,82%. Главным фактором экологической опасности является кадмий, отличающийся наибольшим медианным коэффициентом риска в поверхностном слое (156,00). При этом свинец формирует экстремальные локальные пики риска до 8 316,67, а цинк характеризуется максимальной пространственной вариабельностью с коэффициентом вариации до 173,4%.

Пространственный анализ и расчёт интегральных индексов загрязнения позволили выделить зоны повышенного экологического риска и ранжировать территории по степени техногенной нагрузки. Реальный уровень экологической опасности определяется не только валовым содержанием металлов, но и свойствами почв, регулирующими их подвижность и биодоступность.

Полученные результаты обосновывают необходимость развития системы почвенного мониторинга, применения дифференцированных мер по снижению экологических рисков и восстановлению почв на техногенно нагруженных территориях.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Данное исследование профинансировано в рамках программно-целевого финансирования научных исследований Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан на 2024-2026 годы по программе ИРН BR24992837 «Комплексный экологический мониторинг Восточно-Казахстанской области для устойчивого развития аграрного сектора и улучшения качества окружающей среды».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rouhani A., Gutiérrez M., Newton R.A., Al Souki K.S. An overview of potentially toxic element pollution in soil around lead-zinc mining areas // *Environmental Reviews*. - 2024. - Vol. 33. - P. 1-16. - DOI: 10.1139/er-2024-0052.
2. Yang Q., Li Z., Lu X., Duan Q., Huang L., Bi J. A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural regions in China: Pollution and risk assessment // *Science of the Total Environment*. - 2018. - Vol. 642. - P. 690-700. - DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.068.
3. Ильин В. Б. Тяжелые металлы в системе почва-растение // *Почвоведение*. - 2007. - № 9. - С. 1112-1119.
4. Зырин Н.Г., Чеботарева Н.А. К вопросу о формах соединений меди, цинка, свинца в почвах и доступность их для растений // *Содержание и формы соединений меди, цинка, свинца в почвах и доступность их для растений*. М.:Изд-во МГУ, 1979. - С. 350-386.
5. Salim Y., Yerimbetova A., Baiduisenova T., Uspabayeva A., Abildayeva R., Balgabekova A., Ashirbayeva S., Tleukeyeva A. Soil Pollution with Heavy Metals in the Turkestan Region // *Journal of Ecological Engineering*. - 2023. - Vol. 24. - № 2. - P. 31-38. - DOI: 10.12911/22998993/156801.

6. Junusbekov M. M. et al. Ecological assessment of soil contamination by heavy metals affected in the past by the lead-zinc mining and processing complex in Kentau, Kazakhstan // *Environmental Monitoring and Assessment*. - 2023. - Т. 195. - № 5. - P. 586.
7. Ferreira S.L.C., da Silva J.B., dos Santos I.F., de Oliveira O.M.C., Cerda V., Queiroz A.F.S. Use of pollution indices and ecological risk in the assessment of contamination from chemical elements in soils and sediments - Practical aspects // *Trends in Environmental Analytical Chemistry*. - 2022. - Vol. 35. - P. e00169. - DOI: 10.1016/j.teac.2022.e00169.
8. Liu Z., Wang L., Yan M., Ma B., Cao R. Source apportionment of soil heavy metals based on multivariate statistical analysis and the PMF model: A case study of the Nanyang Basin, China // *Environmental Technology & Innovation*. - 2024. - Vol. 33. - P. 103537. - DOI: 10.1016/j.eti.2024.103537.
9. Cornu S., Keesstra S., Bispo A., Fantappie M., van Egmond F., Smreczak B., Wawer R., Pavlu^o L., Sobocka J., Bakacsi Z., Farkas-Ivanyi K., Molnar S., Møller A.B., Madenoglu S., Feiziene D., Oorts K., Schneider F., da Conceição Gonçalves M., Mano R., et al. National soil data in EU countries, where do we stand? // *European Journal of Soil Science*. - 2023. - Vol. 74. - № 4. - P. e13398. - DOI: 10.1111/ejss.13398.
10. Важенин И.Г. Методические рекомендации по обследованию и картографированию почвенного покрова по уровням загрязненности промышленными выбросами. - М., 1987. - 27 с.
11. Håkanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach // *Water Research*. - 1980. - Vol. 14. - № 8. - P. 975-1001. - DOI: 10.1016/0043-1354(80)90143-8.
12. Шабанов М.В., Маричев М.С. Адсорбция Zn, Cd, Pb, Cu в почвах, подверженных техногенной активности, на примере Красноуральского промузла // *Russian Journal of Ecosystem Ecology*. - 2020. - Vol. 5. - № 1. - С. 1-11. - DOI: 10.21685/2500-0578-2020-1-5.
13. Харина А.Г., Алешина Л.В. Аккумуляция тяжелых металлов в почвах Свердловской области // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. - 2022. - Т. 333. - № 2. - С. 173-183. - DOI: 10.18799/24131830/2022/2/3330.
14. Daurov D., Zhambakin K., Daurova A., Sapakhova Z., Isgandarov I., Ramazanova R., Zhumagulova M., et al. Assessment of heavy metal accumulation in soils and dominant agricultural crops in an industrial environment of Ridder, East Kazakhstan Region // *Plants*. - 2026. - Vol. 15. - № 6. - P. 983. - DOI: 10.3390/plants15060983.
15. Loska K., Wiechuła D., Korus I. Metal contamination of farming soils affected by industry // *Environment International*. - 2004. - Vol. 30. - № 2. - P. 159-165. - ISSN 0160-4120. - DOI: 10.1016/S0160-4120(03)00157-0.

REFERENCES

1. Rouhani A., Gutiérrez M., Newton R.A., Al Souki K.S. An overview of potentially toxic element pollution in soil around lead-zinc mining areas // *Environmental Reviews*. - 2024. - Vol. 33. - P. 1-16. - DOI: 10.1139/er-2024-0052.
2. Yang Q., Li Z., Lu X., Duan Q., Huang L., Bi J. A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural regions in China: Pollution and risk assessment // *Science of the Total Environment*. - 2018. - Vol. 642. - P. 690-700. - DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.068.

3. Ilyin V.B. Tyazhelye metally v sisteme pochva-rastenie // Pochvovedenie. - 2007. - № 9. - P. 1112-1119.
4. Zyrin N.G., Chebotareva N.A. K voprosu o formakh soedineniy medi, tsinka, svintsa v pochvakh i dostupnost' ikh dlya rasteniy // Soderzhanie i formy soedineniy medi, tsinka, svintsa v pochvakh i dostupnost' ikh dlya rasteniy. - M.: Izd-vo MGU, 1979. - P. 350-386.
5. Salim Y., Yerimbetova A., Baiduisenova T., Uspabayeva A., Abildayeva R., Balgabekova A., Ashirbayeva S., Tleukeyeva A. Soil Pollution with Heavy Metals in the Turkistan Region // Journal of Ecological Engineering. - 2023. - № 24(2). - P. 31-38. - DOI: 10.12911/22998993/156801.
6. Junusbekov M.M., et al. Ecological assessment of soil contamination by heavy metals affected in the past by the lead-zinc mining and processing complex in Kentau, Kazakhstan // Environmental Monitoring and Assessment. - 2023. - Vol. 195. - № 5. - P. 586.
7. Ferreira S.L.C., da Silva J.B., dos Santos I.F., de Oliveira O.M.C., Cerda V., Queiroz A.F.S. Use of pollution indices and ecological risk in the assessment of contamination from chemical elements in soils and sediments - Practical aspects // Trends in Environmental Analytical Chemistry. - 2022. - Vol. 35. - P. e00169. - DOI: 10.1016/j.teac.2022.e00169.
8. Zhongpei L., Lu W., Mingjiang Y., Ben M., Runxiang C. Source apportionment of soil heavy metals based on multivariate statistical analysis and the PMF model: A case study of the Nanyang Basin, China // Environmental Technology & Innovation. - 2024. - Vol. 33. - P. 103537. - DOI: 10.1016/j.eti.2024.103537.
9. Cornu S., Keesstra S., Bispo A., Fantappie M., van Egmond F., Smreczak B., Wawer R., Pavlu° L., Sobocka J., Bakacsi Z., Farkas-Ivanyi K., Molnar S., Møller A.B., Madenoglu S., Feiziene D., Oorts K., Schneider F., da Conceiç~ao Gonçalves M., Mano R., ... Chenu C. National soil data in EU countries, where do we stand? // European Journal of Soil Science. - 2023. - Vol. 74. - № 4. - P. e13398. - DOI: 10.1111/ejss.13398.
10. Vazhenin I.G. Metodicheskie rekomendatsii po obsledovaniyu i kartografirovaniyu pochvennogo pokrova po urovnyam zagryaznennosti promyshlennymi vybrosami. - M., 1987. - 27 p.
11. Håkanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach // Water Research. - 1980. - Vol. 14. - № 8. - P. 975-1001. - DOI: 10.1016/0043-1354(80)90143-8.
12. M.V. Shabanov, M.S. Marichev. Adsorbtsiya Zn, Cd, Pb, Cu v pochvakh, podverzhennykh tekhnogennoy aktivnosti, na primere Krasnoural'skogo promuzla // Russian Journal of Ecosystem Ecology. - 2020. - Vol. 5. - № 1. - P. 1-11. - DOI: 10.21685/2500-0578-2020-1-5.
13. Kharina A.G., Aleshina L.V. Akkumulyatsiya tyazhelykh metallov v pochvakh Sverdlovskoy oblasti // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. - 2022. - Vol. 333. - № 2. - P. 173-183. - DOI: 10.18799/24131830/2022/2/3330.
14. Daurov D., Zhambakin K., Daurova A., Sapakhova Z., Isgandarov I., Ramazanova R., Zhumagulova M., et al. Assessment of heavy metal accumulation in soils and dominant agricultural crops in an industrial environment of Ridder, East Kazakhstan Region // Plants. - 2026. - Vol. 15. - № 6. - P. 983. - DOI: 10.3390/plants15060983.
15. Krzysztow L., Danuta W., Irena K. Metal contamination of farming soils affected by industry // Environment International. - 2004. - Vol. 30. - № 2. - P. 159-165. - ISSN 0160-4120. - DOI: 10.1016/S0160-4120(03)00157-0.

ТҮЙІН

Р.Х. Рамазанова^{1*}, А.С. Вырахманова^{1*}, М.К. Жумагулова¹, С.Н. Дуйсеков¹,

А.Д. Газизов¹, Д.Л. Дауров², Ж.Б. Сунатуллаев³

ШЫҒЫС ҚАЗАҚСТАН ТОПЫРАҚТАРЫНЫҢ АУЫР МЕТАЛДАРМЕН ТЕХНОГЕНДІК
ЛАСТАНУЫ: ТҮРЛЕРІН, ЭКОЛОГИЯЛЫҚ ҚАУІПТІ ЖӘНЕ КЕҢІСТІК ҚҰРЫЛЫМЫН
БАҒАЛАУ

¹«Ө.О. Оспанов атындағы Қазақ топырақтану және агрохимия ғылыми-зерттеу институты» ЖШС, 050060, Алматы, әл-Фараби даңғылы, 75В, Қазақстан,

²«Өсімдіктер биологиясы және биотехнологиясы институты» ШЖҚ РМК, 050040, Алматы, Тимирязев көшесі, 45, Қазақстан

³«Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университеті» КеАҚ, 050010, Алматы, Абай даңғылы, 8, Қазақстан, *e-mail: raushasoil88@mail.ru, asem-v80@mail.ru

Топырақтың ауыр металдармен техногендік ластануы Шығыс Қазақстан облысының индустриялық өңірлеріндегі экологиялық қауіптің негізгі факторларының бірі болып табылады. Жұмыста потенциалды уытты элементтердің жалпы және жылжымалы түрлері талдау жүргізіле отырып, тау-кен металлургиялық кәсіпорындарының әсер ету аймақтарындағы топырақтардың агроэкологиялық жағдайына кешенді бағалау ұсынылған. Зерттеу ірі өнеркәсіптік нысандарға жақын орналасқан 28 121 гектар аумақты қамтыды. Топырақтың агрохимиялық және физика-химиялық қасиеттері, сондай-ақ Pb, Zn, Cu және Cd мөлшері анықталды. Ластанудың интегралдық көрсеткіштері мен экологиялық қауіп деңгейі есептеліп, аумақты кеңістіктік аймақтарға бөлу жүргізілді. Зерттеу нәтижесінде ауыр металдардың ең жоғары жинақталуы топырақтың беткі қабаттарында және өнеркәсіптік шығарындылар әсер ететін аймақтарда байқалатыны анықталды. Cd ең қауіпті элемент болып табылды. Алынған нәтижелер экологиялық аудандастыруды жүргізу және мониторинг пен ремедиация жүйелерін әзірлеу үшін негіз болып табылады.

Түйінді сөздер: ауыр металдар, топырақтар, Шығыс Қазақстан, ластану, жылжымалы түрлері, экологиялық тәуекел, ГАЖ.

SUMMARY

R.H. Ramazanova^{1*}, A.S. Vyrakhmanova^{1*}, M.K. Zhumagulova¹, S.N. Duisekov¹,

A.D. Gazizov¹, D.L. Daurov², Zh.B. Sunatullaev³

TECHNOGENIC POLLUTION OF SOILS IN EASTERN KAZAKHSTAN WITH HEAVY METALS:
ASSESSMENT OF FORMS, ENVIRONMENTAL RISK, AND SPATIAL STRUCTURE

¹LLP «Kazakh Scientific Research Institute of Soil Science and Agrochemistry
named after U.U. Uspanov», 050060, Almaty, al-Farabi ave., 75 B, Kazakhstan

²Institute of Plant Biology and Biotechnology, 050040, Almaty, Timiryazev St., 45,
Kazakhstan

³«Kazakh National Agrarian Research University» JSC, 050010, Almaty, Abay Ave., 8,
Kazakhstan, *e-mail: raushasoil88@mail.ru, asem-v80@mail.ru

Technogenic soil pollution with heavy metals is one of the key factors of environmental risk in the industrial regions of the East Kazakhstan region. The paper presents a comprehensive assessment of the agro-ecological condition of soils in the zones of influence of mining and metallurgical enterprises with the analysis of gross and mobile forms of potentially toxic elements. The survey covered 28,121 hectares near large industrial facilities. The agrochemical and physicochemical properties of soils, as well as the content of Pb, Zn, Cu and Cd, have been determined. Integral indicators of pollution and environmental risk have been calculated, spatial zoning has been performed. It has been established that the maximum accumulation of metals is timed to the upper soil horizons and the zones of influence of industrial emissions. The most

dangerous element is Cd. The results obtained form the basis for environmental zoning and the development of monitoring and remediation systems.

Keywords: heavy metals, soils, East Kazakhstan, pollution, mobile forms, environmental risk, GIS.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

1. Рамазанова Раушан Хамзаевна – Председатель Правления, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-2059-709X>, e-mail: raushasoil88@mail.ru

2. Вырахманова Асем Сабиткановна – ученый секретарь, PhD, <https://orcid.org/0000-0002-6295-653X>, e-mail: asem-v80@mail.ru

3. Жумагулова Молдир Кайрболатовна – научный сотрудник, PhD, <https://orcid.org/0000-0001-9392-3688>, e-mail: zhumagulova.mk@mail.ru

4. Дүйсеков Сәкен Нұржанұлы – научный сотрудник отдела мелиорации засоленных почв, магистр, <https://orcid.org/0009-0001-9041-4893>, e-mail: sakenduissekov033@gmail.com

5. Газизов Айдын Долдашевич – научный сотрудник отдела мелиорации засоленных почв, <https://orcid.org/0009-0006-8763-5632> e-mail: gaziz.aydin@gmail.com

6. Дауров Диас Ламзарович – ведущий научный сотрудник лаборатории селекции и биотехнологии, PhD, <https://orcid.org/0000-0003-3073-4577>, e-mail: dias.daurov@gmail.com

7. Сунатуллаев Жанибек Ботирұлы – PhD докторант 2 курса кафедры почвоведения, агрохимии и экологии, <https://orcid.org/0009-0003-0315-0055>, e-mail: janibek.sun@bk.ru