

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ПОЧВЕ

Николай Игоревич Климаков, аспирант

Дмитрий Евгеньевич Кучер, кандидат технических наук, доцент

Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, г. Москва, Россия

E-mail: klim2426@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается проблема обнаружения тяжелых металлов в почве и их влияние на растительность. Обсуждаются основополагающие задачи, современные методы, а также перспективы дальнейших исследований и новые вызовы, стоящие перед научным сообществом. Цель работы – оценка методов обнаружения тяжелых металлов в почве. Обобщены данные экспериментов, подтверждающих эффективность комбинированного метода отбора проб и спектрометрии для определения концентрации тяжелых металлов в почве, а также целесообразность использования спектров отражения растений для измерения загрязнения. Результаты исследований могут иметь практическое применение в области экологии, сельского хозяйства и охраны природы, позволят эффективно контролировать уровень загрязнения тяжелыми металлами и принимать меры по их устранению.

Ключевые слова: тяжелые металлы, диагностика почв, инфракрасная спектроскопия, машинное обучение, предварительная обработка данных, загрязнение почв

MODERN METHODS FOR DETERMINING HEAVY METALS IN SOIL

N.I. Klimakov, PhD Student

D.E. Kucher, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor

Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, Russia

E-mail: klim2426@mail.ru

Abstract. This article discusses the problem of heavy metal detection in soil and its impact on vegetation. Based on the experience of foreign and domestic research, this article discusses global fundamental problems and challenges, modern methods of heavy metal detection, as well as prospects for further research and new challenges facing the scientific community. The aim of the study is to identify modern and established methods for the detection of heavy metals in soil, such as spectral analysis methods and reflectance spectra of plant parts. The review summarizes the results of experimental studies confirming the effectiveness of the combined sampling and spectrometry method for estimating the concentration of heavy metals in soil, as well as the feasibility of using plant reflectance spectra to measure pollution. World experience confirms the expediency of using spectral approaches to determine heavy metals in soil and analyze their impact on vegetation. The results of the research have practical application in the field of ecology, agriculture and nature protection, allow effectively controlling the level of heavy metal pollution and taking measures for its elimination.

Keywords: heavy metals, soil diagnostics, infrared spectroscopy, machine learning, data preprocessing, soil contamination

В научной среде открыта дискуссия по определению термина тяжелых металлов, вместо классического предлагается более конкретное: тяжелые металлы – это встречающиеся в природе металлы с атомным номером более 20 и плотностью более 5 г/см³. [6] В дальнейшем по тексту будем использовать термин «тяжелые металлы» к конкретной группе химических элементов и их соединений.

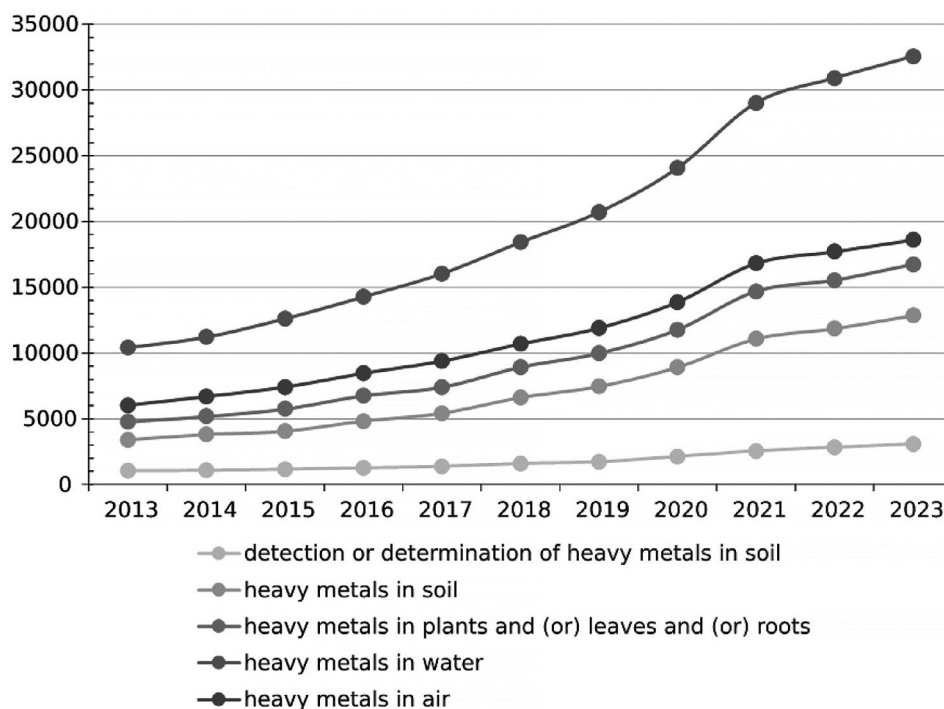
Согласно сведениям базы данных Science Direct by Elsevier с 2013 по 2023 год (дата доступа 05.04.2024) расчет количество публикаций об обнаружении тяжелых металлов в различных средах и их влиянии на организмы. Применяли поисковые запросы: 1 – почва: detection or determination of heavy metals in soil и heavy metals in soil; 2 – растения: heavy metals in plants and (or) leaves and (or) roots; 3 – вода: heavy metals in water; 4 – воздух: heavy metals in air (см. рисунок).

Последние исследования выделяют несколько потенциально токсичных элементов (ртуть, кадмий, мышьяк и свинец), практически не поддающихся биологическому разложению и имеющих необратимый накопительный эффект. [19] Скрытый и опасный путь попадания тяжелых металлов в организм че-

ловека – пищевая продукция. [17] Тяжелые металлы оказывают пагубное неспецифическое токсическое влияние на большинство растений, приводят к болезням, изменениям проницаемости клеточной мембраны, подавлению роста, изменению кислотности, гибели. [1–3]

Некоторые растения адаптировались к избыточному, превышающему естественный фон, содержанию тяжелых металлов в почве, выработав специфический механизм ионного обмена. [3] Степень накопления тяжелых металлов и других загрязняющих веществ неодинакова, она определяется коэффициентом биоконцентрации (отношение концентрации загрязняющий веществ в частях растений к концентрации в субстрате, в котором они произрастают). [7, 14]

При оценке количественных показателей тяжелых металлов в среде, особенно почвах, необходимо учитывать их естественные фоновые концентрации. Повышенные значения связаны с деятельностью человека. [9, 31] Наибольший объем тяжелых металлов поступает с предприятий черной и цветной металлургии, автомобильного транспорта, электростанций, работающих на сжигаемом топливе. [4, 18]



Количество публикаций о тяжелых металлах в различных средах и их обнаружение в базе данных Science Direct by Elsevier.

Почва – место стока для тяжелых металлов. Катионообменная способность почвы определяет ее свойство удерживать минеральные вещества. [14] Содержание глины и органики играет важную роль в оценке емкости катионного обмена почвы. Чтобы ее рассчитать, измеряют количество положительно заряженных минералов (натрий, калий, кальций и магний). Чем выше емкость катионного обмена, тем больше времени занимает увеличение pH. Температура и кислотность почвенной среды или раствора адсорбента влияют на поглощение ими загрязняющих веществ. [8]

Проблема загрязнения тяжелыми металлами различных сред признается на мировом уровне, подтверждается Протоколом по тяжелым металлам, принятым 24 июня 1998 года в г. Орхусе (Дания). Обзор методов определения позволит ранжировать их по степени эффективности в применении к конкретному химическому элементу и среде, в которой он содержится.

Цель исследования – оценка современных методов обнаружения тяжелых металлов в почве.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Мы сделали обзор современных технологий, описанных в зарубежных и отечественных источниках, в области определения тяжелых металлов в почве, воде и растениях.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

К классическим методам относят полевые с забором проб исследуемого вещества или среды, с дальнейшим химическим определением содержания тяжелых металлов. Обретают популярность методы спектрального анализа с помощью ручных спектрометров или камер, установленных на спутниках или беспилотных летательных аппаратах. [20, 33, 40]

Методы определения тяжелых металлов в почве и растениях

Тяжелые металлы в почве можно определять через почвенные образцы, спектральный анализ почвенной поверхности, а также концентрацию тяжелых металлов в растениях или используя сложные модели распространения и миграции элементов от источника загрязнения. [26]

Химические методы – экстракция уксусной кислотой (обменные и специфически адсорбированные металлы), восстановителем (связанные с гидроксидами Fe/Mn), окислителем (с органическим веществом почвы).

Основные диапазоны электромагнитного излучения для анализа почв – ближний (NIR) и средний (MIR) инфракрасный спектр. При спектрометрии почв применяют диффузное отражение падающего луча. [5, 22, 25]

Наибольшей точностью обладает метод лабораторной спектрометрии, для которого необходимо отбирать почвенные образцы. Но он очень затратный по времени и ресурсам, неприменим к большим площадям, таким как сельскохозяйственные угодья. [10,35] Поэтому используют комбинированный метод отбора проб, определение спектрометром концентрации тяжелых металлов, изучение спектра с помощью дистанционного зондирования, поиск корреляции данных, по результатам которой строят математические модели и находят правильный спектр. [38]

Основной компонент, влияющий на спектр отражения листьев растений и полога, – хлорофилл. Основываясь на корреляции между концентрацией тяжелых металлов в почве и хлорофиллом растительности, можно оценить содержание опасных элементов по спектрам отражения уязвимых растений. [16]

В некоторых исследованиях отмечено, что содержание никеля, кадмия, меди, цинка и свинца в почвах

речных пойм имеет хорошую связь со спектрами отражения видов трав, а также, что спектры отражения райграсса в видимой и ближней инфракрасной областях могут быть взяты для оценки содержания цинка в пойменных почвах. [13] Другие работы демонстрируют, как можно отследить загрязнение сельскохозяйственных почв мышьяком, используя спектры отражения риса, сравнив его с количеством хлорофилла в пологе. [9, 31]

Метод спектрометрии имеет свои недостатки. Для каждого химического элемента нужно определять его диапазон по отдельности, и усложняется этот поиск тем, что в каждой почве они будут «выглядеть» по-разному. Поэтому в мире существуют «библиотеки» спектральных диапазонов для различных типов и видов почв, данные которых необходимы, чтобы достоверно определить концентрации химических элементов.

Преимущества спектрометрии – быстрота и эффективность, частичная сохранность образцов, возможность анализа в реальном времени, высокая чувствительность и точность, недостатки – ограниченность диапазонов и разрешений, необходимость калибровки, воздействие внешних факторов на результат (освещение, температура, влажность), сложность интерпретации данных, фоновые концентрации тяжелых металлов. [30, 34]

Уровень содержания тяжелых металлов в растениях и физиологические параметры можно оценить, анализируя информацию о спектральном отражении. Часто используемые спектры для получения информации о растениях – HSI, Vis-NIR, CHI-FI, LIBS и RS. [29, 37]

Методы определения тяжелых металлов в воде

Высокие концентрации тяжелых металлов в воде могут быть последствием чрезмерного водопотребления, сброса неочищенных сточных вод с предприятий. Загрязнения переходят в источники питьевой воды, почву при ирригации полей для засеивания, аккумулируются в тканях рыб. [28] Тяжелые металлы становятся причиной неврологических, респираторных, онкологических заболеваний, а также приводят к почечной недостаточности и слабости костей. [11] В Бангладеш был проведен эксперимент, при котором взяли пробы из пяти рек в прибрежной зоне. Для оценки загрязнения использовали индексы качества воды (WQI), металлов (MQI) и загрязнения металлов (MPI). Они показали, что концентрация тяжелых металлов превышена для показателей питьевой воды и критична для водных экосистем, но может быть применена в технических целях, в том числе для орошения полей. Состояние акватории также оценивали комбинированным подходом с помощью самоорганизующихся карт (SOM), позитивной матричной факторизации (PMF), географических информационных систем (GIS) и индекса корреляции Пирсона. Наибольшая концентрация зафиксирована в устьях рек. [12]

В некоторых странах центральные системы водоснабжения представляют опасность в отношении содержания тяжелых металлов из-за застоя воды в водопроводной системе, кулере, баках для горячей воды и водопроводных трубах. Для очистки воды чаще используют недорогие адсорбенты и смягчители осадка, а не эффективные способы (мембранная фильтрация, электролиз, мембранная дистилляция, ионный обмен).

Для озер важный индикатор – донные отложения, так как при отсутствии интенсивного перемещения водных масс, слой осадочных пород аккумулирует загрязнение продолжительное время на одном участке, сохраняя непосредственный контакт с водой. Из озера Бейшехир в Турции (источник питьевой воды) были взяты пробы воды и донных отложений. По индексам нагрузки загрязнения (PLI) и коэффициента геоаккумуляции (Igeo) выявили присутствие марганца, но в допустимой концентрации. [29] В реках распределение тяжелых металлов в донных отложениях будет менее равномерным. При изучении реки Тиста в Индии самая высокая аккумуляция тяжелых металлов была обнаружена в устье. Пробы готовили к анализу методом индуктивно-связанной плазмо-оптической эмиссионной спектроскопии (ICP-OES Model No. iCap 7600 Duo), данные обрабатывали с помощью корреляции Пирсона, анализа кластерного и главных компонент (PCA). [11]

Для определения содержания тяжелых металлов в воде чаще всего применяют данные гиперспектрального анализа, но он может быть менее эффективен при низких концентрациях. Чтобы повысить точность, используют эмпирические анализы и оценку на основе алгоритмов для выбора наиболее важных спектральных переменных. [8, 21] В лабораторных исследованиях самые точные показатели получают, используя масс-спектрометрический прибор, который требует наименьшей подготовки. Провести одновременно анализ на органические компоненты можно манипулируя микроволновой энергией, эффективно ионизируя тяжелые металлы и органические компоненты (без фрагментации). [39]

Методы обработки сведений и моделирование

Семейство методов частичных наименьших квадратов PLS известны, как билинейные факторные модели. PLS используют для нахождения фундаментальных соотношений между двумя матрицами (X и Y), то есть подхода со скрытой переменной к моделированию ковариационных структур в этих двух пространствах. Модель PLS попытается найти многомерное направление в пространстве X, которое объясняет максимальное направление многомерной дисперсии в пространстве Y. Регрессия PLS особенно подходит, когда матрица предикторов содержит больше переменных, чем наблюдений, и существует мультиколлинеарность среди значений X. Стандартная регрессия в этих случаях завершится неудачей. [26, 27] Регрессия по методу частичных наименьших квадратов (PLSR) – это статистический метод, который позволяет решить проблему коллинеарности данных, а также ситуации, когда количество переменных значительно превышает объем выборки.

Определение содержания тяжелых металлов в верхних слоях почвенного покрова с помощью отбора проб, независимо от дальнейшего метода, предполагает построение моделей распределения концентраций тяжелых металлов в пространстве. [20, 33] В полевом опыте невозможно отобрать пробы с минимальным шагом и при этом охватить большую площадь. [10, 15, 32] Следовательно, требуется моделирование с экстра- или интерполяцией данных об исследуемой территории или среде и определение наилучшей модели поливариограмм в соответствии с их точностью. [22, 24, 36]

Если данные не подчиняются нормальному распределению, применяют логарифмические преобразования для предположения о равной дисперсии. [5, 25] В публикациях встречается использование полувариограммных моделей (гауссова, экспоненциальная, стабильная и сферическая) для различных тяжелых металлов. Их точность оценивали по средней стандартизированной ошибке, среднеквадратичной и средней стандартной. [23, 29]

В настоящее время разрабатывается множество специализированных моделей распределения тяжелых металлов в почве и растениях, учитывающих фоновое содержание конкретного элемента или влияние и накопление различных элементов при концентрациях (валовое содержание) тяжелых металлов как фоновых значений. Например, LSMМ (латентная разреженная смешанная модель) рассчитана для обнаружения способности растений накапливать селен в зависимости от наличия тяжелых металлов в почве. [34]

В одной из провинций Китая применили усовершенствованный метод для оценки загрязнения тяжелыми металлами в системе «почва-растение». Это позитивная матричная факторизация (PMF) для определения корреляций между концентрациями тяжелых металлов в почве, установленных с помощью атомно-флуоресцентной спектрометрии. Формула расчета включает содержание элементов в образцах почвы, коэффициенты вклада факторов источников загрязнения, профили источников тяжелых металлов и остаточную матрицу. [40]

Распространение обретает модель SD-PCA (пространственное распределение – анализ главных компонент). Она объединяет пространственные характеристики источников загрязнения со статистическим анализом, обеспечиваемым PCA, и предлагает комплексную оценку загрязнения почвы тяжелыми металлами. [22]

Таким образом, можно говорить о разнообразных подходах к обработке сведений и тенденции исследователей создать собственные уникальные модели, по которым производится расчет и распределение тяжелых металлов в изучаемой среде. Множество инновационных решений приводит к усложнению выбора необходимой модели при определенных условиях.

По результатам обзора можно выделить несколько перспективных задач: разработка улучшенных методов дистанционного зондирования для обнаружения тяжелых металлов в почве; объединение мировых библиотек спектральных диапазонов определяемых элементов для универсального использования по всему миру; изучение взаимосвязи между генотипом растений и их способностью отражать спектральные сигналы, связанные с наличием тяжелых металлов в почве; усовершенствование методов обработки данных для улучшения точности установления концентрации тяжелых металлов в почве и растениях; развитие новых спектральных методов исследования растений.

Выводы. Комбинированный метод отбора проб, определение с помощью спектрометра концентрации тяжелых металлов и изучение спектра с использованием дистанционного зондирования позволяет получать более точные и объективные данные о тяжелых металлах. Результаты исследований подтверждают возможность применения спектральных данных для оценки состояния экосистемы и контроля загрязнения в раз-

личных условиях. Это особенно важно в контексте сохранения биоразнообразия и обеспечения здоровья человека. Необходимы точные и надежные методы мониторинга загрязнения окружающей среды и работа в этом направлении продолжится.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Абилова Г.А. Влияние ионов кадмия и свинца на рост и содержание пролина в растениях тритикале (*Triticosecale Wittm.*) // Труды Карельского научного центра РАН. 2016. С. 27.
2. Пишик В.И. др. Механизмы адаптации растений к тяжелым металлам // Агрофизика. 2015. С. 39–49.
3. Терехова В.А. и др. Фитотоксичность тяжелых металлов в дерново-подзолистых почвах разной степени окультуренности // Почвоведение. 2021. № 6. С. 757–768.
4. Шабанов М.В., Стрекулев Г.Б. Геохимические процессы накопления тяжелых металлов в ландшафтах Южного Урала // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332. № 1. С. 184–192.
5. Adhikari K. et al. Heavy metals concentration in soils across the conterminous USA: Spatial prediction, model uncertainty, and influencing factors // *Sci. Total Environ.* 2024. V. 919. 170972.
6. Ali H., Khan E. What are heavy metals? Long-standing controversy over the scientific use of the term 'heavy metals' – proposal of a comprehensive definition // *Toxicol. Environ. Chem.* 2018. Т. 100. № 1. P. 6–19.
7. Anning A.K., Akoto R. Assisted phytoremediation of heavy metal contaminated soil from a mined site with *Typha latifolia* and *Chrysopogon zizanioides* // *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2018. Т. 148. P. 97–104
8. Bai B. et al. The remediation efficiency of heavy metal pollutants in water by industrial red mud particle waste // *Environ. Technol. Innov.* 2022. V. 28. 102944.
9. Bhuyan M.S. Contamination of Heavy Metals in Agricultural Soils: Ecological and Health Risk Assessment // *SF J. Nanochemistry Nanotechnol.* 2019
10. Chen Y.-G. et al. Impacts of heavy metals and medicinal crops on ecological systems, environmental pollution, cultivation, and production processes in China // *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2021. V. 219. 112336.
11. Chettri U., Chakrabarty T.K., Joshi S.R. Pollution index assessment of surface water and sediment quality with reference to heavy metals in Teesta River in Eastern Himalayan range, India // *Environ. Nanotechnol. Monit. Manag.* 2022. V. 18. 100742.
12. Choudhury T.R. et al. Appraisal of heavy metal contamination and their source apportionment identification in five river water systems of the coastal areas in Bangladesh // *Reg. Stud. Mar. Sci.* 2024. V. 70. 103378.
13. Fu P. et al. A novel spectral analysis method for distinguishing heavy metal stress of maize due to copper and lead: RDA and EMD-PSD // *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2020. V. 206. 111211.
14. Gani A. et al. An empirical investigation on the elimination of heavy metals using bioremediation method for selected plant species // *Phys. Chem. Earth Parts ABC.* 2024. Т. 134. 103568
15. Genova G. et al. Analyzing soil enzymes to assess soil quality parameters in long-term copper accumulation through a machine learning approach // *Appl. Soil Ecol.* 2024. V. 195. 105261.
16. Hammam A.A. et al. Assessment of Soil Contamination Using GIS and Multi-Variate Analysis: A Case Study in El-Minia Governorate, Egypt // *Agronomy.* 2022. V. 12. № 5. 1197.

17. Hossain Md. M. et al. Heavy metal pollution in the soil-vegetable system of Tannery Estate // *Environ. Nanotechnol. Monit. Manag.* 2021. T. 16. 100557.
18. Jadaa W., Mohammed H.K. Heavy Metals – Definition, Natural and Anthropogenic Sources of Releasing into Ecosystems, Toxicity, and Removal Methods – An Overview Study // *J. Ecol. Eng.* 2023. V. 24. № 6. P. 249–271.
19. Jannetto P.J., Cowl C.T. Elementary Overview of Heavy Metals // *Clin. Chem.* 2023. T. 69. № 4. P. 336–349.
20. Khumaeni A. et al. Transversely Excited Atmospheric CO₂ Laser-Induced Plasma Spectroscopy for the Detection of Heavy Metals in Soil // *J. Appl. Spectrosc.* 2018. V. 84. № 6. P. 1108–1113.
21. Lin Y. et al. Estimating low concentration heavy metals in water through hyperspectral analysis and genetic algorithm-partial least squares regression // *Sci. Total Environ.* 2024. V. 916. 170225.
22. Liu J. et al. A spatial distribution – Principal component analysis (SD-PCA) model to assess pollution of heavy metals in soil // *Sci. Total Environ.* 2023. V. 859. 160112.
23. Liu N. et al. Development of smartphone-controlled and machine-learning-powered integrated equipment for automated detection of bioavailable heavy metals in soils // *J. Hazard. Mater.* 2024. V. 465. 133140.
24. Liu X. et al. A portable electromagnetic heating-microplasma atomic emission spectrometry for direct determination of heavy metals in soil // *Talanta.* 2020. V. 219. 121348.
25. Liu Z. et al. Source apportionment of soil heavy metals based on multivariate statistical analysis and the PMF model: A case study of the Nanyang Basin, China // *Environ. Technol. Innov.* 2024. V. 33. 103537.
26. Nawar S. et al. Estimation of key potentially toxic elements in arid agricultural soils using Vis-NIR spectroscopy with variable selection and PLSR algorithms // *Front. Environ. Sci.* 2023. V. 11.
27. Optical imaging spectroscopy coupled with machine learning for detecting heavy metal of plants: A review. Li J, Ren J, Cui R, Yu K and Zhao Y. 2022. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2022.1007991/full> (дата обращения: 04.02.2024).
28. Potharaju R., Aruna M. A Study on Heavy Metal Pollution in Water, 2024. P. 110–120.
29. Şener E., Şener Ş., Bulut C. Assessment of heavy metal pollution and quality in lake water and sediment by various index methods and GIS: A case study in Beyşehir Lake, Turkey // *Mar. Pollut. Bull.* 2023. V. 192. 115101.
30. Tomczyk P. et al. Assessment of heavy metal contamination of agricultural soils in Poland using contamination indicators // *Ecol. Indic.* 2023. V. 156. 111161.
31. Velayatzadeh M. Heavy Metals in Surface Soils and Crops // *Heavy Metals – Recent Advances: IntechOpen*, 2023
32. Wang H. et al. Improving prediction of soil heavy metal(loid) concentration by developing a combined Co-kriging and geographically and temporally weighted regression (GTWR) model // *J. Hazard. Mater.* 2024. V. 468. 133745.
33. Wang N. et al. Predicting the spatial pollution of soil heavy metals by using the distance determination coefficient method // *Sci. Total Environ.* 2021. V. 799. p. 149452.
34. Xie T. et al. Modeling analysis of the characteristics of selenium-rich soil in heavy metal high background area and its impact on main crops // *Ecol. Inform.* 2021. V. 66. 101420.
35. Yang S. et al. An integrated analysis on source-exposure risk of heavy metals in agricultural soils near intense electronic waste recycling activities // *Environ. Int.* 2019. V. 133. 105239.
36. Yang Y. et al. Beyond mere pollution source identification: Determination of land covers emitting soil heavy metals by combining PCA/APCS, GeoDetector and GIS analysis // *CATENA.* 2020. V. 185. 104297.
37. Yao C. et al. Heavy metal pollution in agricultural soils from surrounding industries with low emissions: Assessing contamination levels and sources // *Sci. Total Environ.* 2024. V. 917. 170610.
38. Zhang J. et al. Environmental geochemical baseline determination and pollution assessment of heavy metals in farmland soil of typical coal-based cities: A case study of Suzhou City in Anhui Province, China // *Heliyon.* 2023. V. 9. № 4. e14841.
39. Zhao G. et al. Simultaneous and on-line detection of organic and heavy metal components in water using a novel nebulization-assisted injection plasma ionization triple quadruple mass spectrometry instrument // *Anal. Chim. Acta.* 2024. V. 1304. 342531.
40. Zhao H. et al. Comprehensive assessment of heavy metals in soil-crop system based on PMF and evolutionary game theory // *Sci. Total Environ.* 2022. V. 849. 157549.

REFERENCES

1. Abilova G.A. Vliyaniye ionov kadmiya i svinca na rost i sodержanie prolina v rasteniyah tritikale (*Triticosecale* Wittm.) // *Trudy Karel'skogo nauchnogo centra RAN.* 2016. S. 27.
2. Pishik V.I. dr. Mekhanizmy adaptatsii rastenij k tyazhelym metallam // *Agrofizika.* 2015. S. 39–49.
3. Terekhova V.A. i dr. Fitotoksichnost' tyazhelyh metallov v dernovo-podzolistykh pochvah raznoj stepeni okul'turnosti // *Pochvovedenie.* 2021. № 6. S. 757–768.
4. Shabanov M.V., Strekulev G.B. Geohimicheskie processy nakopleniya tyazhelyh metallov v landshaftah Yuzhnogo Urala // *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov.* 2021. T. 332. № 1. S. 184–192.
5. Adhikari K. et al. Heavy metals concentration in soils across the conterminous USA: Spatial prediction, model uncertainty, and influencing factors // *Sci. Total Environ.* 2024. V. 919. 170972.
6. Ali H., Khan E. What are heavy metals? Long-standing controversy over the scientific use of the term 'heavy metals' – proposal of a comprehensive definition // *Toxicol. Environ. Chem.* 2018. T. 100. № 1. P. 6–19.
7. Anning A.K., Akoto R. Assisted phytoremediation of heavy metal contaminated soil from a mined site with *Typha latifolia* and *Chrysopogon zizanioides* // *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2018. T. 148. P. 97–104
8. Bai B. et al. The remediation efficiency of heavy metal pollutants in water by industrial red mud particle waste // *Environ. Technol. Innov.* 2022. V. 28. 102944.
9. Bhuyan M.S. Contamination of Heavy Metals in Agricultural Soils: Ecological and Health Risk Assessment // *SF J. Nanochemistry Nanotechnol.* 2019
10. Chen Y.-G. et al. Impacts of heavy metals and medicinal crops on ecological systems, environmental pollution, cultivation, and production processes in China // *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2021. V. 219. 112336.
11. Chettri U., Chakrabarty T.K., Joshi S.R. Pollution index assessment of surface water and sediment quality with reference to heavy metals in Teesta River in Eastern Himalayan range, India // *Environ. Nanotechnol. Monit. Manag.* 2022. V. 18. 100742.
12. Choudhury T.R. et al. Appraisal of heavy metal contamination and their source apportionment identification in five river water systems of the coastal areas in Bangladesh // *Reg. Stud. Mar. Sci.* 2024. V. 70. 103378.
13. Fu P. et al. A novel spectral analysis method for distinguishing heavy metal stress of maize due to copper and lead: RDA and EMD-PSD // *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2020. V. 206. 111211.

14. Gani A. et al. An empirical investigation on the elimination of heavy metals using bioremediation method for selected plant species // *Phys. Chem. Earth Parts ABC*. 2024. T. 134. 103568
15. Genova G. et al. Analyzing soil enzymes to assess soil quality parameters in long-term copper accumulation through a machine learning approach // *Appl. Soil Ecol*. 2024. V. 195. 105261.
16. Hammam A.A. et al. Assessment of Soil Contamination Using GIS and Multi-Variate Analysis: A Case Study in El-Minia Governorate, Egypt // *Agronomy*. 2022. V. 12. № 5. 1197.
17. Hossain Md. M. et al. Heavy metal pollution in the soil-vegetable system of Tannery Estate // *Environ. Nanotechnol. Monit. Manag*. 2021. T. 16. 100557.
18. Jadaa W., Mohammed H.K. Heavy Metals – Definition, Natural and Anthropogenic Sources of Releasing into Ecosystems, Toxicity, and Removal Methods – An Overview Study // *J. Ecol. Eng*. 2023. V. 24. № 6. P. 249–271.
19. Jannetto P.J., Cowl C.T. Elementary Overview of Heavy Metals // *Clin. Chem*. 2023. T. 69. № 4. P. 336–349.
20. Khumaeni A. et al. Transversely Excited Atmospheric CO₂ Laser-Induced Plasma Spectroscopy for the Detection of Heavy Metals in Soil // *J. Appl. Spectrosc*. 2018. V. 84. № 6. P. 1108–1113.
21. Lin Y. et al. Estimating low concentration heavy metals in water through hyperspectral analysis and genetic algorithm-partial least squares regression // *Sci. Total Environ*. 2024. V. 916. 170225.
22. Liu J. et al. A spatial distribution – Principal component analysis (SD-PCA) model to assess pollution of heavy metals in soil // *Sci. Total Environ*. 2023. V. 859. 160112.
23. Liu N. et al. Development of smartphone-controlled and machine-learning-powered integrated equipment for automated detection of bioavailable heavy metals in soils // *J. Hazard. Mater*. 2024. V. 465. 133140.
24. Liu X. et al. A portable electromagnetic heating-microplasma atomic emission spectrometry for direct determination of heavy metals in soil // *Talanta*. 2020. V. 219. 121348.
25. Liu Z. et al. Source apportionment of soil heavy metals based on multivariate statistical analysis and the PMF model: A case study of the Nanyang Basin, China // *Environ. Technol. Innov*. 2024. V. 33. 103537.
26. Nawar S. et al. Estimation of key potentially toxic elements in arid agricultural soils using Vis-NIR spectroscopy with variable selection and PLSR algorithms // *Front. Environ. Sci*. 2023. V. 11.
27. Optical imaging spectroscopy coupled with machine learning for detecting heavy metal of plants: A review. Li J, Ren J, Cui R, Yu K and Zhao Y. 2022. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2022.1007991/full> (дата обращения: 04.02.2024).
28. Potharaju R., Aruna M. A Study on Heavy Metal Pollution in Water, 2024. P. 110–120.
29. Şener E., Şener Ş., Bulut C. Assessment of heavy metal pollution and quality in lake water and sediment by various index methods and GIS: A case study in Beyşehir Lake, Turkey // *Mar. Pollut. Bull*. 2023. V. 192. 115101.
30. Tomczyk P. et al. Assessment of heavy metal contamination of agricultural soils in Poland using contamination indicators // *Ecol. Indic*. 2023. V. 156. 111161.
31. Velayatzadeh M. Heavy Metals in Surface Soils and Crops // *Heavy Metals – Recent Advances: IntechOpen*, 2023
32. Wang H. et al. Improving prediction of soil heavy metal(loid) concentration by developing a combined Co-kriging and geographically and temporally weighted regression (GTWR) model // *J. Hazard. Mater*. 2024. V. 468. 133745.
33. Wang N. et al. Predicting the spatial pollution of soil heavy metals by using the distance determination coefficient method // *Sci. Total Environ*. 2021. V. 799. p. 149452.
34. Xie T. et al. Modeling analysis of the characteristics of selenium-rich soil in heavy metal high background area and its impact on main crops // *Ecol. Inform*. 2021. V. 66. 101420.
35. Yang S. et al. An integrated analysis on source-exposure risk of heavy metals in agricultural soils near intense electronic waste recycling activities // *Environ. Int*. 2019. V. 133. 105239.
36. Yang Y. et al. Beyond mere pollution source identification: Determination of land covers emitting soil heavy metals by combining PCA/APCS, GeoDetector and GIS analysis // *CATENA*. 2020. V. 185. 104297.
37. Yao C. et al. Heavy metal pollution in agricultural soils from surrounding industries with low emissions: Assessing contamination levels and sources // *Sci. Total Environ*. 2024. V. 917. 170610.
38. Zhang J. et al. Environmental geochemical baseline determination and pollution assessment of heavy metals in farmland soil of typical coal-based cities: A case study of Suzhou City in Anhui Province, China // *Heliyon*. 2023. V. 9. № 4. e14841.
39. Zhao G. et al. Simultaneous and on-line detection of organic and heavy metal components in water using a novel nebulization-assisted injection plasma ionization triple quadruple mass spectrometry instrument // *Anal. Chim. Acta*. 2024. V. 1304. 342531.
40. Zhao H. et al. Comprehensive assessment of heavy metals in soil-crop system based on PMF and evolutionary game theory // *Sci. Total Environ*. 2022. V. 849. 157549.

Поступила в редакцию 12.06.2024

Принята к публикации 26.06.2024