

ОБОБЩЕННЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВЫ И РАСТИТЕЛЬНОСТИ МЕДЬЮ И ЦИНКОМ В РАЙОНЕ МЕДНОКОЛЧЕДАННОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

А. Н. Медведев, М. А. Медведев

Институт промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

Статья посвящена вопросам развития методики экологического мониторинга зоны влияния медноколчеданных месторождений с изучением загрязнения почвы и травянистой растительности рудными металлами. На основе анализа известных исследований о закономерностях миграции меди и цинка в системе «почва – растение» высказана гипотеза о перспективности использования обобщенного показателя K_0 , представляющего собой сумму отнесенных к нормативным значениям концентраций меди и цинка в почве и растительности. Проверка гипотезы с использованием данных натурального опробования показала, что положение отвала вскрышных пород медноколчеданного карьера на профиле четко фиксируется по увеличению K_0 на 60–120 % в ближайших к отвалу точках. С учетом имеющихся данных о разном характере накопления меди и цинка в разных видах растительности сделан вывод о том, что предложенный обобщенный показатель может быть рекомендован для использования в экологическом мониторинге зоны влияния медноколчеданных месторождений для повышения информативности и достоверности исследований.

Ключевые слова: мониторинг; загрязнение; почва; травянистая растительность; медь; цинк; медноколчеданное месторождение.

1. Введение

Технологические процессы и отходы горных предприятий обуславливают загрязнения почвы в районе их размещения. Почвы накапливают входящие в состав руд тяжелые металлы и могут служить индикатором экологической обстановки территории, поэтому изучение загрязнения почвы широко используется при экологическом мониторинге зоны возможного влияния горных предприятий. Повышение содержания тяжелых металлов в почве ведет к их миграции в произрастающую на загрязненных территориях естественную травянистую растительность и сельскохозяйственные культуры и к возможному поступлению в организм животных и человека [1–4].

Экспериментальные исследования [5] показали, что накопление таких металлов, как медь и цинк, в травянистой растительности происходит по-разному, в частности, цинк и медь по степени подвижности можно расположить в следующий ряд: $Zn > Cu$. Авторы отмечают, что медь образует более прочные специфические связи с компонентами почвы, чем цинк, который связывается неспецифическим образом и имеет более высокую подвижность. В работах [6, 7] была отмечена разная интенсивность накопления металлов в различных видах растительности, а также было получено, что поглощение тяжелых металлов может иметь барьерный характер и уменьшаться при наличии избыточных количеств металлов в почве, не превышающих критических для растительности уровней.

Учитывая указанные особенности, в районах добычи медноколчеданных руд целесообразно контролировать состояние не только почвы, что в соответствии с нормативными документами является обязательным компонентом производственного экологического контроля (ПЭК) [8], но и растительности для получения более достоверной информации о загрязнении территории рудными металлами.

Институтом промышленной экологии УрО РАН в рамках реализации программы экологического мониторинга и ПЭК зоны влияния Сафьяновского медноколчеданного месторождения (район г. Режа Свердловской области) выполнялись исследования

загрязнения почвы и растительности. Они показали, что концентрации рудных металлов меди и цинка в большинстве точек опробования оставались ниже предельно допустимых концентраций (ПДК) в почве [9] и максимальных допустимых уровней (МДУ) в растительности [10, 11]. Относительно повышенные значения концентраций наблюдались только в непосредственной близости от породных отвалов, причем в разных точках для почвы и растительности [12], что согласуется с выводами работ [1, 5, 6].

Кроме того, было получено, что мониторинг загрязнения растительности тяжелыми металлами (рудные металлы: медь и цинк, микроэлементы: никель, свинец, кадмий, мышьяк) с применением кластерного анализа в качестве метода классификации точек опробования является более информативным видом исследования [12], чем мониторинг загрязнения почвы, т. к. позволяет выделить в разные кластеры точки с различным механизмом загрязнения (преимущественно загрязнение подотвальными водами, аэрогенное загрязнение, фоновые точки).

Таким образом, мониторинг загрязнения почвы и травянистой растительности представляет собой два вида исследований, совместное использование которых может дать более достоверную информацию об уровне и масштабе загрязнения территории в районе горного предприятия рудными металлами. Учитывая отмеченные многими авторами особенности накопления тяжелых металлов в почве и растительности при различных уровнях загрязнения [1, 5–7], была высказана гипотеза о перспективности использования показателя, обобщающего данные этих исследований.

Настоящая статья посвящена оценке целесообразности использования обобщенного показателя загрязнения почвы и растительности в районе размещения карьера медноколчеданных руд с целью возможного повышения контрастности выделения относительно более загрязненных точек территории на общем фоне.

2. Материалы и методы

Оценка выполнена с использованием результатов химического анализа проб почвы и растительности, отобранных в июле 2018 г. в 8 точках, расположенных на одном профиле, проходящем вблизи Сафьяновского карьера (рис. 1). Использование данных 2018 г. обусловлено тем, что в 2019 г. в связи с изменением нормативных требований и низким влиянием карьера на состояние почвы и растительности за пределами его санитарно-защитной зоны (1 000 м) программа ПЭК была существенно сокращена, а новые данные в необходимом для оценки объеме отсутствуют.

Пробы почвы отбирались в соответствии с принятыми в эколого-геохимических исследованиях методиками [13, 14] с глубины 0–15 см методом квадратного конверта. Вес сборной пробы составлял не менее 0,5 кг. Пробоподготовка включала сушку на воздухе, дробление, растирание в порошок, просеивание, растворение в кислотах. Отбор растительности проводился параллельно в тех же точках посредством срезания надземной части травянистых растений и получения объединенной пробы весом не менее 0,5 кг. Пробоподготовка включала сушку на воздухе, резку, озоление проб.

Химический анализ выполнялся в аккредитованной лаборатории АО «Сафьяновская медь». Методика выполнения измерений [15] и относительная погрешность химического анализа для меди и цинка, а также нормативы ПДК [9] и МДУ [10, 11] этих металлов для почвы и растительности приведены в табл. 1, результаты измерений – в табл. 2.

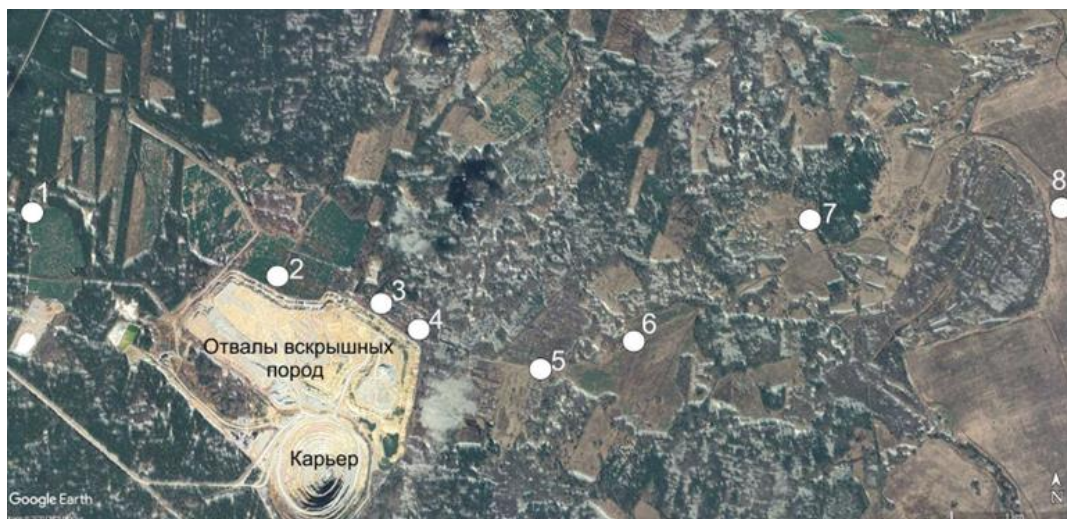


Рис. 1. Схема расположения точек отбора проб почвы и травянистой растительности в районе Сафьяновского карьера, М 1:50 000 (подложка – Google Earth 2018)

Таблица 1. Методы и погрешности измерений

Показатель	Нормативный документ на методику измерений	Относительная погрешность, %	ПДК, мг/кг (с учетом фона/кларка)	МДУ, мг/кг
Медь	ПНД Ф 16.1:2:3:3.11-98	20	132	30
Цинк	ПНД Ф 16.1:2:3:3.11-98	20	220	50

Таблица 2. Результаты химического анализа проб почвы и растительности, мг/кг

Элемент	Номер точки	Содержание в почве, мг/кг	Содержание в травянистой растительности, мг/кг
Медь	1	24,7	14,4
	2	23,3	12,7
	3	34,8	13,6
	4	24,4	14,3
	5	33,9	13,2
	6	30	10,7
	7	34,8	11,2
	8	28,5	12,3
Цинк	1	71,4	26,9
	2	62,4	121,4
	3	66,3	83,1
	4	60,7	74,6
	5	61,1	30,2
	6	65,2	24,5
	7	72,8	23,2
	8	69,4	23,3

3. Результаты и обсуждение

По результатам измерений (табл. 2) построены графики отнесенных к ПДК концентраций меди (Кмп) и цинка (Кцп) в почве (рис. 2) и отнесенных к МДУ концентраций меди (Кмр) и цинка (Кцр) в растительности (рис. 3).

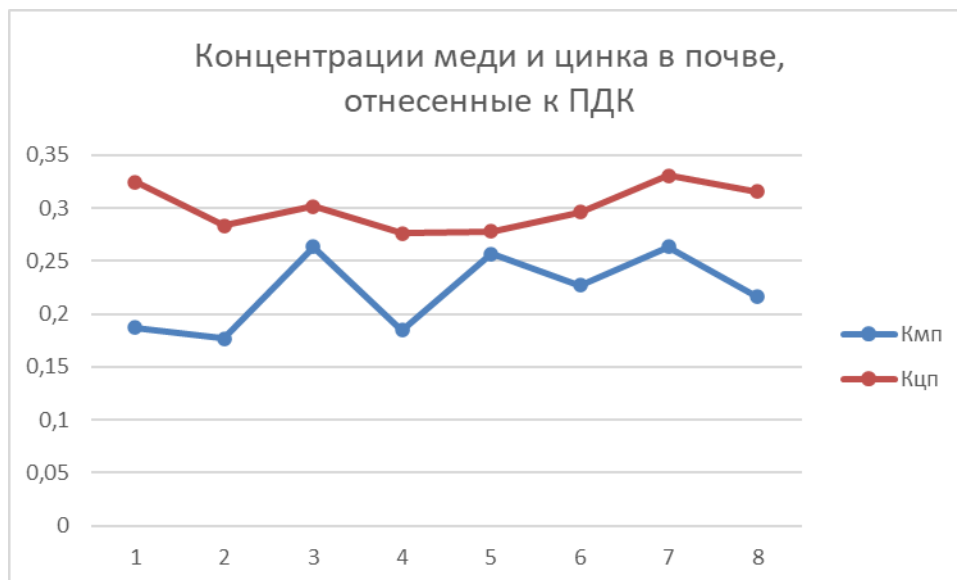


Рис. 2. Концентрации меди (Кмп) и цинка (Кцп) в почве, отнесенные к ПДК, для точек опробования 1–8

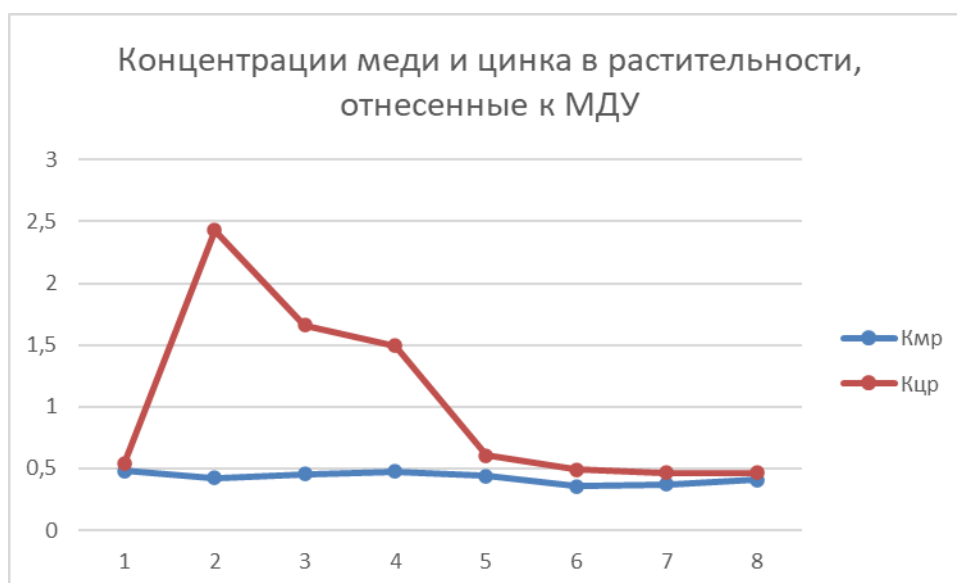


Рис. 3. Концентрации меди (Кмр) и цинка (Кцр) в растительности, отнесенные к МДУ, для точек опробования 1–8

Как видно из графика рис. 2, концентрации меди и цинка в почве существенно ниже ПДК (в 3–5,5 раза). Наличие на профиле карьера и отвалов не проявляется; наблюдаются незначительные (5–20 %) разнонаправленные колебания Кмп и Кцп, не связанные с расположением точек опробования относительно карьера и отвалов. Относительно повышенные значения Кмп и Кцп наблюдаются как вблизи отвалов (точка 3), так и на значительном удалении от них (точки 5 и 7 по меди, 1 и 7 по цинку).

Концентрации меди в растительности также существенно ниже МДУ (в 2–2,8 раза) и незначительно изменяются по профилю от 0,36 до 0,48 МДУ.

В то же время на графике для относительной концентрации цинка в растительности Кцр (рис. 3) контрастно выделяются точки 2, 3, 4, расположенные в непосредственной близости (порядка 20 м) от подошвы отвала вскрышных пород (увеличение Кцр в 2,5–4,5 раза).

Данный результат подтверждает полученный ранее вывод [12] о том, что мониторинг загрязнения растительности является на данном объекте более информативным видом исследования по сравнению с изучением загрязнения почвы.

Причем основную полезную информацию несут данные о загрязнении цинком, что согласуется с выводами исследований [5–7] и объясняется большей подвижностью цинка по сравнению с медью в системе «почва – растение» для многих видов травянистой растительности. На графике по меди также наблюдаются относительно повышенные значения $K_{мр}$ в точках 3, 4, 5 (до 30 % при относительной погрешности измерений 20 %), т. е. имеет место локальный максимум малой амплитуды, несколько смещенный по профилю относительно расположения ближайших к отвалам точек. Поэтому данные о концентрации меди в растительности также несут полезную информацию о расположении отвалов относительно точек профиля.

С учетом того, что рудные элементы поступают в почву и затем мигрируют в системе «почва – растение», было высказано предположение о перспективности использования в экологическом мониторинге обобщенных показателей загрязнения почвы и растительности по меди $K_{мо}$ и цинку $K_{цо}$:

$$K_{мо} = K_{мп} + K_{мр},$$

$$K_{цо} = K_{цп} + K_{цр},$$

а также обобщенного показателя K_o загрязнения почвы и растительности суммарно по меди и цинку:

$$K_o = K_{мо} + K_{цо}.$$

На рис. 4 представлены графики указанных обобщенных показателей по профилю.

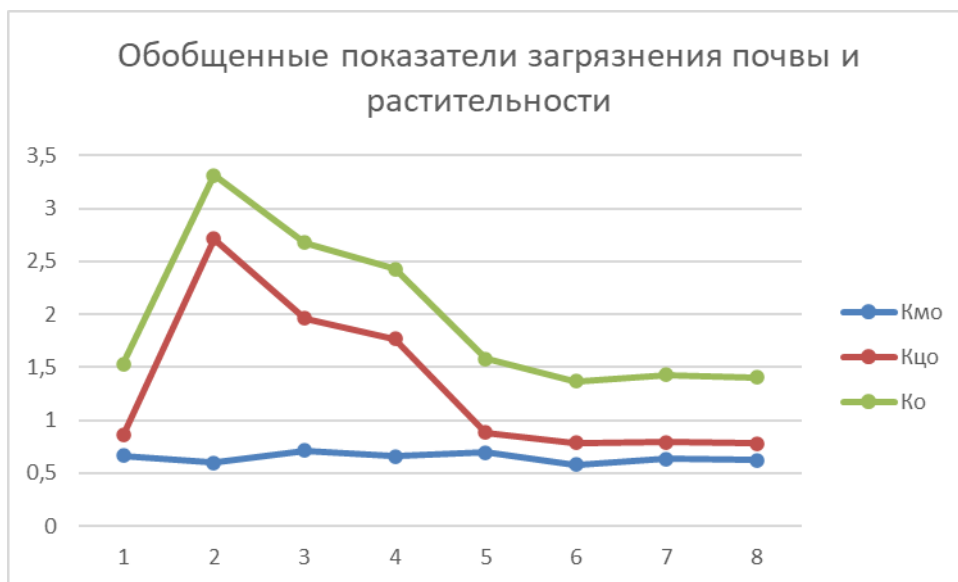


Рис. 4. Обобщенные показатели загрязнения почвы и растительности медью и цинком

Как видно из рис. 4, обобщенные показатели по меди $K_{мо}$ и цинку $K_{цо}$ повторяют форму графиков относительных концентраций меди и цинка в растительности $K_{мр}$ и $K_{цр}$ (рис. 3) с общим увеличением уровня на 0,2–0,3 ед. за счет вклада относительных концентраций меди и цинка в почве (рис. 2). При этом амплитуда максимума на графике $K_{цо}$ несколько уменьшилась по сравнению с показателем $K_{цр}$ и превышает фон (точки 1, 5) в 3,1–3,2 раза.

Показатель $K_{мо}$ малоинформативен (как и $K_{мр}$); относительно повышенные значения наблюдаются в точках 3, 4, 5 аналогично графику $K_{мр}$ (рис. 3), амплитуда максимума не превышает 20 %.

График обобщенного показателя K_o повторяет форму графиков для $K_{цо}$ и $K_{цр}$. В ближайших к отвалам точках 2, 3, 4 наблюдаются повышенные в 1,6–2,2 раза (на 60–120 %) значения K_o , что меньше, чем для показателя $K_{цр}$ (превышение в 2,5–4,5 раза над фоном), тем не менее положение отвалов на профиле по показателю K_o четко фиксируется с учетом того, что относительная погрешность измерений составляла 20 %.

Авторы многих исследований отмечают, что при общей более высокой подвижности цинка по сравнению с медью в системе «почва – растение» накопление этих металлов в разных видах травянистой растительности происходит по-разному и данный вопрос недостаточно изучен [1, 5–7]. В связи с этим можно ожидать, что в других точках окрестностей рассматриваемого карьера и отвалов, где произрастают другие виды травянистой растительности, может наблюдаться более интенсивная аккумуляция меди в растительности и могут быть получены более контрастные графики для обобщенного показателя загрязнения K_0 , что даст дополнительную информацию для локализации источника загрязнения.

4. Заключение

Анализ известных исследований показал, что характер аккумуляции меди и цинка из почвы различается для разных видов травянистой растительности, что позволило высказать гипотезу о перспективности использования при экологическом мониторинге зоны влияния медного рудника обобщенного показателя K_0 , представляющего собой сумму нормированных к величинам нормативов ПДК и МДУ концентраций меди и цинка в почве и растительности точек опробования.

Проверка гипотезы с использованием данных опробования почвы и растительности показала, что положение отвалов вскрышных пород медноколчеданного карьера на профиле четко фиксируется по увеличению K_0 на 60–120 % в ближайших к отвалу точках.

Амплитуда повышенных значений K_0 меньше по сравнению с относительным показателем загрязнения растительности цинком $K_{цр}$, который в рассматриваемом случае невысокого уровня загрязнения (24–35 мг/кг меди в почве и 11–14 мг/кг в растительности; 61–73 мг/кг цинка в почве и 23–121 мг/кг в растительности) является наиболее информативным, что согласуется с данными других исследований.

При общей более высокой подвижности цинка по сравнению с медью в системе «почва – растение» накопление этих металлов в разных видах травянистой растительности происходит по-разному; данный вопрос недостаточно изучен, что отмечено многими авторами.

В связи с этим можно ожидать, что в других точках окрестностей карьера и отвалов, где произрастают другие виды трав, могут быть получены более контрастные графики для обобщенного показателя загрязнения K_0 , что даст дополнительную информацию для локализации источника загрязнения.

Таким образом, обобщенный показатель загрязнения почвы и травянистой растительности медью и цинком может быть рекомендован для использования при экологическом мониторинге зоны влияния медноколчеданных месторождений для повышения информативности и достоверности исследований.

5. Список литературы

1. Кужина, Г. Ш. Исследование содержания тяжелых металлов в почвах и растительности в окрестностях недействующих и отработанных карьеров Башкирского Зауралья / Г. Ш. Кужина, Г. А. Ягафарова, С. И. Янтурин // Научно-методический электронный журнал «Концепт». – 2014. – № Т. 20. – С. 2426–2430. – EDN QNMENO.
2. Хабибуллина, Ф. М. Трансформация растительности, почв и почвенной микробиоты в зоне воздействия породных отвалов угольной шахты «Воркутинская» / Ф. М. Хабибуллина, Е. Г. Кузнецова, А. Н. Панюков // Теоретическая и прикладная экология. – 2015. – № 4. – С. 30–37. – EDN VLEZSP.
3. Leila, B. Impacts of mining activities on soil properties: case studies from Morocco mine sites / B. Leila, B. Loubna, B. Ali // Soil Science Annual. – 2021. 71(4): 395–407. – DOI:10.37501/soilsa/133011.
4. Heavy Metal Migration in Soil-Plant System in Conditions of Urban Environmental Pollution / A. Petukhov, T. Kremleva, N. Khritokin, G. Petukhova // Air, Soil and Water Research. – 2023. – Vol. 16. – DOI 10.1177/11786221231184202. – EDN QFIUTS.

5. *Жаркова, Н. Н.* Интенсивность биологического накопления микроэлементов (цинка и меди) растениями *Echinacea purpurea* L. в условиях Западной Сибири / Н. Н. Жаркова, В. В. Сухоцкая, Ю. И. Ермохин // Овощи России. – 2020. – № 2. – С. 87–90. – DOI 10.18619/2072-9146-2020-2-87-90. – EDN PONXBA.
6. *Popova, E.* Accumulation of heavy metals in soil and plants adjacent to municipal solid waste disposal facility / E. Popova // Journal of Physics: Conference Series, Tomsk, 24–27 апреля 2018 года. – Vol. 1145. – Tomsk: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 012021. – DOI 10.1088/1742-6596/1145/1/012021. – EDN XLBNJT.
7. *Спицына, С. Ф.* Физиологические барьеры при поглощении меди, цинка и марганца растениями из почвы в условиях равнинной части Алтайского края / С. Ф. Спицына, А. А. Томаровский, Г. В. Оствальд // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2014. – № 7(117). – С. 56–59. – EDN SJIQSF.
8. Приказ Минприроды России от 08.12.2020 № 1030 «Об утверждении Порядка проведения собственниками объектов размещения отходов, а также лицами, во владении или в пользовании которых находятся объекты размещения отходов, мониторинга состояния и загрязнения окружающей среды на территориях объектов размещения отходов и в пределах их воздействия на окружающую среду» (Зарегистрировано в Минюсте России 25.12.2020 № 61832).
9. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. СанПиН 1.2.3685-21 (Зарегистрировано в Минюсте России 29.01.2021 № 62296).
10. *Антонов, Б. И.* Лабораторные исследования в ветеринарии / Б. И. Антонов // Химико-токсикологические исследования. Гид. – М : «Агропромиздат», 1989.
11. Временный максимально-допустимый уровень (МДУ) содержания некоторых химических элементов и госсипола в кормах для сельскохозяйственных животных и кормовых добавках (утв. Госагропромом СССР 07.08.1987). https://e-ecolog.ru/docs/2_ZQ3WixyX-JDuUum-Sk7?utm_referrer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2F (дата обращения: 10.08.2023).
12. *Medvedev, A.* About statistical analysis of environmental pollution monitoring data obtained in the vicinity of a copper quarry / A. Medvedev, M. Medvedev, N. Medvedev // AIP Conference Proceedings 2425, 110030 (2022); <https://doi.org/10.1063/5.0081589>. (дата обращения: 10.08.2023).
13. *Вострокнутов, Г. А.* Временное методическое руководство по проведению геохимических исследований при геоэкологических работах / Г. А. Вострокнутов // ПГО «Уралгеология». – Екатеринбург, 1991.
14. *Алексеевко, В. А.* Геохимия ландшафта и окружающая среда / В. А. Алексеевко – М.: Наука, 1990. – 142 с.
15. ПНД Ф 16.1:2:3:3.11-98. Методика выполнения измерений содержания металлов в твердых объектах методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. – М., 1998 (издание 2005 г.). <https://meganorm.ru/Data2/1/4293777/4293777593.pdf> (дата обращения: 18.08.2023).

Сведения об авторах:

Медведев Александр Николаевич, к. т. н., доцент, ведущий научный сотрудник Института промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия. Эл. почта: amed@esko.uran.ru.

Медведев Максим Александрович, к. э. н., научный сотрудник Института промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия.

GENERALIZED INDICATOR OF SOIL AND VEGETATION POLLUTION WITH COPPER AND ZINC IN THE AREA OF COPPER PYRITE ORE DEPOSIT

A. N. Medvedev, M. A. Medvedev

*Institute of Industrial Ecology of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Ekaterinburg, Russia*

The article is devoted to the development of methodic for environmental monitoring of the copper pyrite deposits influence zone with the study of soil and herbaceous vegetation contamination with ore metals. Based on an analysis of known studies on the patterns of copper and zinc migration in the soil-plant system, a hypothesis has been put forward about the prospects of using the generalized indicator K_o , which is the sum of the normalized to standard values concentrations of copper and zinc in soil and vegetation. Testing the hypothesis using field sampling data showed that the position of the dump of overburden rocks of a copper pyrite quarry on the profile is clearly indicated by an increase in K_o by 60–120 % at the closest to the dump points. Taking into account the available data on the different nature of the copper and zinc accumulation in different types of vegetation, it was concluded that the proposed generalized indicator can be recommended for use in environmental monitoring of copper pyrite deposits influence zone to increase the information content and reliability of research.

Key words: monitoring; pollution; soil; herbaceous vegetation; copper; zinc; copper pyrite deposit.

References

1. *Kuzina, G. Sh.* The study of content of heavy metals in soils and vegetation in the vicinity of inactive and waste quarries the Bashkir Zauralye / G. Sh. Kuzina, G. A. Yagafarova, S. I. Janturin // Scientific and methodological electronic journal «Koncept». – 2014. – № V. 20. – P. 2426–2430. – EDN QNMENO [In Russian].
2. *Khabibullina, F. M.* Transformation of vegetation, soils, and soil microbiota in the impact zone of the coal mine "Vorkutinskaya" / F. M. Khabibullina, E. G. Kuznetsova, A. N. Panyukov // Theoretical and applied ecology. – 2015. – № 4. – P. 30–37. – EDN VLEZSP [In Russian].
3. *Leila, B.* Impacts of mining activities on soil properties: case studies from Morocco mine sites / B. Leila, B. Loubna, B. Ali // Soil Science Annual. – 2021. 71(4): 395–407. – DOI:10.37501/soilsa/133011.
4. Heavy Metal Migration in Soil-Plant System in Conditions of Urban Environmental Pollution / A. Petukhov, T. Kremleva, N. Khritokin, G. Petukhova // Air, Soil and Water Research. – 2023. – Vol. 16. – DOI 10.1177/11786221231184202. – EDN QFIUTS.
5. *Zharkova, N. N.* Intensity of biological accumulation of microelements (zinc and copper) plants of *Echinacea purpurea* L. under conditions of Western Siberia / N. N. Zharkova, V. V. Sukhotskaya, Yu. I. Ermokhin // Vegetables crops of Russia. – 2020. – № 2. – P. 87–90. – DOI 10.18619/2072-9146-2020-2-87-90. – EDN PONXBA [In Russian].
6. *Popova, E.* Accumulation of heavy metals in soil and plants adjacent to municipal solid waste disposal facility / E. Popova // Journal of Physics: Conference Series, Tomsk, 24–27 апреля 2018 года. – Vol. 1145. – Tomsk: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 012021. – DOI 10.1088/1742-6596/1145/1/012021. – EDN XLBNJT.
7. *Spitsyna, S. F.* Physiological barriers in absorption of copper, zinc and manganese by plants from soil in the plain part of the altai region / S. F. Spitsyna, A. A. Tomarovskiy, G. V. Ostwald // Bulletin of Altai State Agricultural University. – 2014. – № 7(117). – P. 56–59. – EDN SJIQSF [In Russian].
8. Prikaz Minprirody Rossii ot 08.12.2020 N 1030 «Ob utverzhdenii Poryadka provedeniya sobstvennikami ob"ektov razmeshcheniya othodov, a takzhe licami, vo vladenii ili v pol'zovanii kotoryh nahodyatsya ob"ekty razmeshcheniya othodov, monitoringa sostoyaniya i zagryazneniya okruzhayushchej sredy na territoriyah ob"ektov razmeshcheniya othodov i v predelakh ih vozdejstviya na okruzhayushchuyu sredu» (Zaregistrovano v Minyuste Rossii 25.12.2020 N 61832). [In Russian].

9. Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov srede obitaniya. SanPiN 1.2.3685-21 (Zaregistrovano v Minyuste Rossii 29.01.2021 N 62296). [In Russian].
10. *Antonov, B. I.* Laboratornye issledovaniya v veterinarii / B. I. Antonov // Himiko-toksikologicheskie issledovaniya. Gid. – M : «Agropromizdat», 1989. [In Russian].
11. Vremennyy maksimal'no-dopustimyy uroven' (MDU) sodержaniya nekotoryh himicheskikh elementov i gossipola v kormah dlya sel'skohozyajstvennyh zhivotnyh i kormovyh dobavkah (utv. Gosagropromom SSSR 07.08.1987). https://e-ecolog.ru/docs/2_ZQ3Wixyx-JDuUum-Sk7?utm_referrer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2F (accessed: 10.08.2023). [In Russian].
12. *Medvedev, A.* About statistical analysis of environmental pollution monitoring data obtained in the vicinity of a copper quarry / A. Medvedev, M. Medvedev, N. Medvedev // AIP Conference Proceedings 2425, 110030 (2022); <https://doi.org/10.1063/5.0081589>.
13. *Vostroknutov, G. A.* Vremennoe metodicheskoe rukovodstvo po provedeniyu geohimicheskikh issledovaniy pri geoekologicheskikh rabotah / G. A. Vostroknutov // PGO «Uralgeologiya». – Ekaterinburg, 1991. [In Russian].
14. *Alekseenko, V. A.* Geohimiya landshafta i okruzhayushchaya sreda / V. A. Alekseenko – M.: Nauka, 1990. – 142 p. [In Russian].
15. PND F 16.1:2:3:3.11-98. Metodika vypolneniya izmerenij sodержaniya metallov v tverdyh ob"ektah metodom spektrometrii s induktivno-svyazannoj plazmoj. – M., 1998 (izdanie 2005 g.). <https://meganorm.ru/Data2/1/4293777/4293777593.pdf> (accessed: 18.08.2023). [In Russian].