

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ РЕКУЛЬТИВИРОВАННОГО ХВОСТОХРАНИЛИЩА

А.Д. Моргоева¹, С.А. Соколова², А.А. Меженков², В.Э. Болдырева², Ю.А. Литвинов²

¹ Северо-Кавказский горно-металлургический институт
(государственный технологический университет), Владикавказ, Россия,
e-mail: m.angelika-m@yandex.ru

² Академия биологии и медицины им. Д.И. Ивановского,
Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация: Целью исследования являлась оценка пространственного распределения и факторной структуры загрязнения почв подвижными формами Cu, Mn, Ni, Pb, Zn, Cd на рекультивированном хвостохранилище и прилегающей территории с учетом направления от источника загрязнения. Использованы корреляционный анализ, сравнение с предельно допустимыми концентрациями и анализ главных компонент. Результаты показали, что максимальные концентрации Cu, Zn, Cd, Ni, Mn, превышающие предельно допустимую концентрацию в 2–7 раз, зафиксированы не на самом хвостохранилище, а в направлении «выше» по склону, что указывает на доминирование ветрового переноса мелкодисперсной фракции против направления водного стока. Свинец, напротив, демонстрирует максимум в зоне хвостохранилища и на участках «ниже» по склону. Методом главных компонент выделены две компоненты, объясняющие 86% дисперсии: первая интерпретируется как контраст между ассоциацией Cu–Zn–Cd–Ni–Mn и Pb (фактор переноса с хвостохранилища), вторая – как разделение Mn+Ni и остальных элементов, связанное с их подвижностью в щелочной среде при pH 7–9. Научная новизна заключается в том, что вопреки классическим представлениям о преимущественном переносе загрязнений вниз по рельефу выявлено аномальное накопление тяжелых металлов выше источника. Это требует пересмотра схем постмониторинга рекультивированных хвостохранилищ с обязательным учетом розы ветров и техногенной пылевой нагрузки.

Ключевые слова: тяжелые металлы, рекультивированное хвостохранилище, подвижные формы элементов, ветровой перенос загрязнений, пространственное распределение, анализ главных компонент, геохимические аномалии.

Благодарность: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-76-31013 в Южном федеральном университете.

Для цитирования: Моргоева А. Д., Соколова С. А., Меженков А. А., Болдырева В. Э., Литвинов Ю. А. Исследование пространственной неоднородности загрязнения почв в зоне влияния рекультивированного хвостохранилища // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 8. – С. 79–91. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_8_0_79.

Spatial nonuniformity of soil pollution in influence zone of reclaimed tailings dam

A.D. Morgoeva¹, S.A. Sokolova², A.A. Mezhenkov², V.E. Boldyreva², Y.A. Litvinov²

¹ North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University),
Vladikavkaz, Russia, e-mail: m.angelika-m@yandex.ru

² Academy of Biology and Medicine, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

Abstract: The aim of the study was assessment of spatial distribution and factor structure of soil pollution with mobile forms of Cu, Mn, Ni, Pb, Zn and Cd at a reclaimed tailings dam and in adjacent area with regard to direction from the pollution source. The study used the correlation analysis, comparison with the maximum allowable concentrations and the analysis of the main components. The results show that the maximum concentrations of Cu, Zn, Cd, Ni and Mn, higher than MAC by 2–7 times, are recorded not at the test tailings dam but in the upslope direction, which points at the domination of wind transportation of fine fractions over their aqueous run-off. Lead, vice versa, demonstrates maximum concentration in the zone of the tailings dam and in the areas downslope. The method of principal components identifies two components which explain 85% dispersion: the first component is interpreted as a contrast between the Cu–Zn–Cd–Ni–Mn association and Pb (factor of transfer from the tailings dam); the second component—as a difference of Mn+Ni and the other elements because of their mobility in the alkaline medium at pH 7–9. The scientific novelty of the study consists in the determination of the anomalous concentration of heavy metals above their source as opposed to the classical concept of the dominant downhill transportation of the pollutants. This fact requires revision of post-monitoring flow sheets at reclaimed tailings dams with obligatory recording of wind rose and production-induced dust load.

Key words: heavy metals, reclaimed tailings dam, mobile elements, wind transportation of pollutants, spatial distribution, analysis of main components, geochemical anomalies.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation, Grant No. 25-76-31013, and was carried out at the Southern Federal University.

For citation: Morgoeva A. D., Sokolova S. A., Mezhenkov A. A., Boldyreva V. E., Litvinov Y. A. Spatial nonuniformity of soil pollution in influence zone of reclaimed tailings dam. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(8):79–91. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_8_0_79.

Введение

Даже после рекультивации и вывода из эксплуатации хвостохранилищ горно-обогатительных предприятий эти объекты не перестают быть источниками долговременного техногенного воздействия. Цель нашей работы — оценить, как распределяется в пространстве загрязнение почв подвижными формами тяжелых металлов (Cu, Mn, Ni, Pb, Zn, Cd) на рекультивированном хвостохранилище и прилегающей территории, и на

этой основе повысить информативность систем экологического контроля за подобными сооружениями.

Наряду с полевыми наблюдениями исследователи все чаще прибегают к аналитическим расчетам, которые позволяют качественно и количественно оценить техногенный след от антропогенных объектов, включая уже выведенные из эксплуатации и рекультивированные. Наш коллектив уже провел серию эмпирических исследований, нап-

равненных на снижение неопределенности при оценке экологического состояния территории вокруг объектов горно-обогатительной промышленности [1–3]. Проблема пространственной неоднородности загрязнения почв в зонах влияния горнодобывающих объектов [4, 5], в том числе рекультивированных хвостохранилищ, остается острой из-за длительной миграции тяжелых металлов. В современных работах подчеркивается, что необходим комплексный мониторинг почвенного покрова с применением многомерных статистических методов [6–8] — только так можно выявить скрытые закономерности в распределении поллютантов.

Так, в работе [9] авторы изучают воздействие техногенных объектов на городские почвы с помощью корреляционного анализа К. Пирсона, оценивая связи между содержанием тяжелых металлов и физико-химическими свойствами почв. Аналогичный подход использован в исследовании [10], где с помощью анализа главных компонент (РСА, principal component analysis) удалось выделить основные источники загрязнения — от старых хвостохранилищ до сельскохозяйственных стоков. Метод РСА позволяет сократить размерность данных и выделить латентные факторы, которые управляют пространственным распределением элементов.

Обычно объектами мониторинга служат почвы приповерхностного горизонта (0–20 см) и профильные разрезы в зонах активного ветрового и водного переноса. В работах [11, 12] рассмотрены рекультивированные хвостохранилища разного возраста. Авторы этих исследований отмечают: даже после завершения технической рекультивации пространственная неоднородность загрязнения не исчезает, а проявляется в виде пятнистого распределения мышьяка, свинца и кадмия.

В [13] корреляционный анализ К. Пирсона используется совместно с геостатистикой — оцениваются связи между содержанием элементов и биоиндикационными показателями (микробное дыхание, ферментативная активность). Полезность РСА для разграничения природных и техногенных аномалий продемонстрирована в [14] на примере мониторинга почв в зоне влияния хвостохранилищ медных рудников.

Данные [15, 16] подтверждают: нельзя игнорировать риски вторичного загрязнения, поступающего через корневые системы растений и грунтовые воды. Чтобы выявлять пространственную структуру загрязнения, нередко применяют факторный анализ с последующей кластеризацией [17]; такой подход позволяет картировать участки с разной степенью экологической опасности [18, 19]. В обзоре [20] суммирован опыт использования РСА и корреляционного анализа для оценки результативности рекультивационных мероприятий на хвостохранилищах в различных климатических зонах.

Материалы и методы

Исходную базу составили результаты полевых исследований. В табл. 1 приведено описание всех рассмотренных и проанализированных данных.

Корреляционный анализ проводился для оценки тесноты линейной связи между концентрациями загрязняющих веществ и факторами (расстояние, направление от источника загрязнения, pH почвы). Цель анализа — выявление парных зависимостей содержания металлов в почве. Расчет коэффициента парной корреляции Пирсона выполнен по методике, аналогичной той, что представлена в [1]. Матрица корреляции Пирсона (тепловая карта) показала сильные положительные связи ($r > 0,7$) между Cu, Zn, Cd, Ni и Mn, что подтверждает их

Таблица 1

Описание исходных данных
Input data description

Обозначение	Описание, ед. изм.
ID	Идентификатор записи
Direction	Направление от источника (0 – ниже, 1 – выше, 2 – на территории)
Distance	Расстояние, м
pH	Водородный показатель
Cu_mob, Mn_mob, Ni_mob, Pb_mob, Zn_mob, Cd_mob	Концентрация подвижных форм металлов, мг/кг

общий источник и согласованное пространственное распределение (рис. 1). Напротив, Pb продемонстрировал отрицательные корреляции с перечисленными элементами.

Анализ полученных и представленных в виде матрицы корреляций результатов позволяет заметить следующее.

Ниже хвостохранилища кислотность почвы больше в среднем на 0,2 (рН 7,25 в среднем для проб почвы, взятых

выше хвостохранилища, 7,45 – ниже хвостохранилища, 7,39 – на территории хвостохранилища). Об этом свидетельствует обратная зависимость $-0,5$ на матрице корреляции. Направление (Direction) от хвостохранилища – это категориальный признак, преобразованный к числовому (1 – выше хвостохранилища, 0 – ниже, 2 – на территории хвостохранилища). Существует линейная связь между содержанием металлов

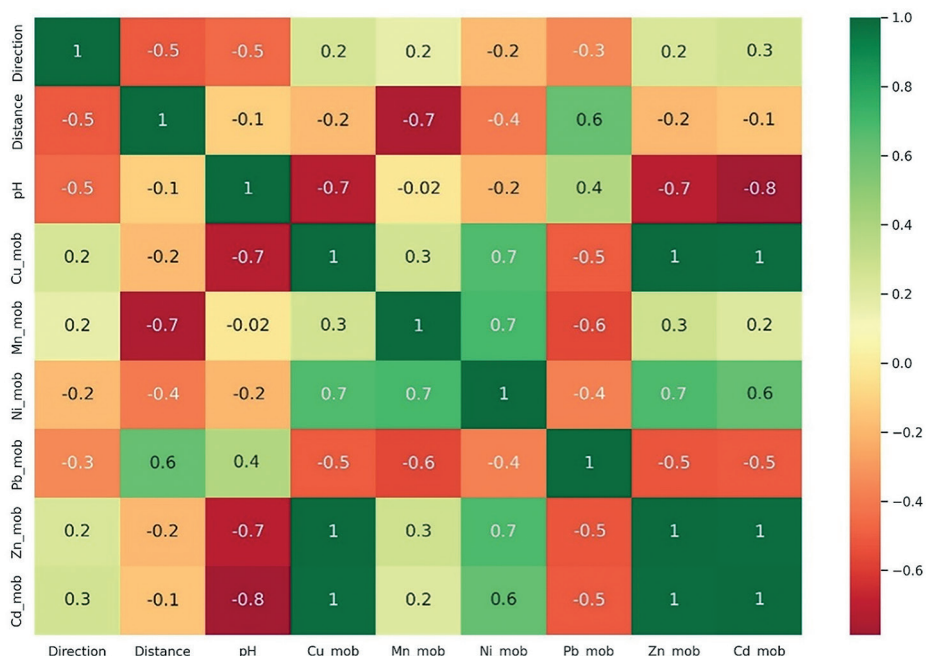


Рис. 1. Матрица корреляции концентрации подвижных форм металлов в почве

Fig. 1. Correlation matrix of the metals mobile forms content in the soil

Превышения ПДК в почвах (1 – превышает, 0 – нет)

0	1	0	0	1	1	1
1	1	0	0	1	1	1
2	1	0	0	1	1	0
3	1	0	0	1	1	0
4	0	0	0	1	1	0
5	1	0	0	1	1	0
6	0	0	0	1	0	0
	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn	Cd

Элементы

Рис. 2. Бинарная матрица превышения ПДК в почве (1 – превышает, 0 – в пределах ПДК) по каждому металлу

Fig. 2. Binary matrix of the maximum permissible concentration in the soil (1 – excess, 0 – within the maximum permissible concentration) for each metal

Cd, Zn, Cu и водородным показателем: при увеличении содержания этих металлов кислотность уменьшается, о чем свидетельствует сильная линейная связь. Свинец и pH имеют прямую линейную зависимость – при увеличении концентрации Pb кислотность почвы также увеличивается.

Металлы медь, цинк и кадмий связаны функциональной линейной зависи-

мостью, при этом все они тесно связаны с никелем в прямом направлении и свинцом (в обратном).

Марганец тесно связан с никелем (0,7) и Pb (-0,6), при этом содержание его в пробах ниже хвостохранилища больше, чем в пробах, взятых выше хвостохранилища в среднем на 11 мг/кг.

Для количественной оценки масштаба загрязнения почвенного покрова на

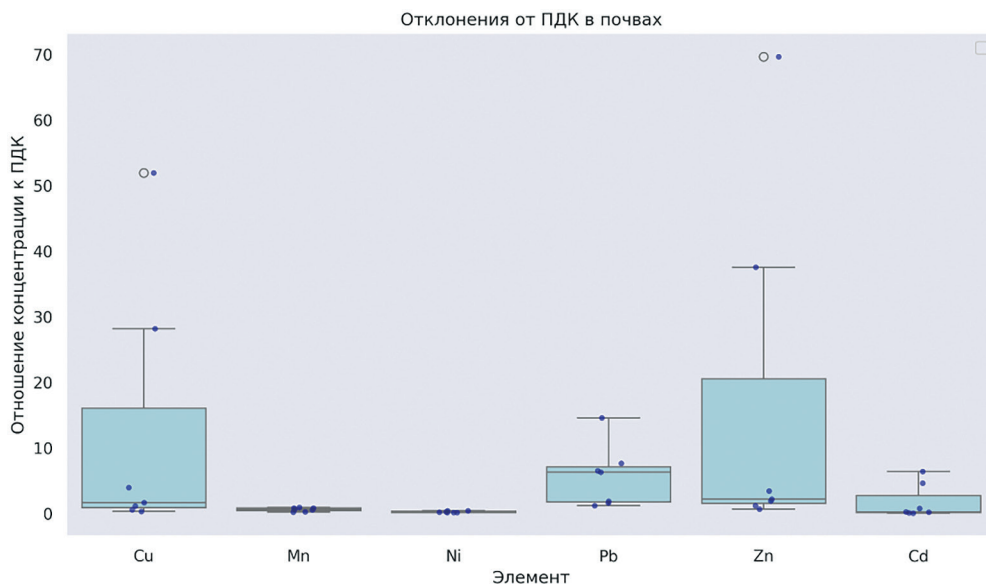


Рис. 3. Отношение концентрации подвижных форм металлов к ПДК в почве

Fig. 3. The ratio of the concentration of mobile forms of metals to the MPC in the soil

территории и вблизи хвостохранилища также было выполнено сравнение концентрации подвижных форм металлов с ПДК.

Исходный набор данных был дополнен признаками — величинами отклонения данных проб от ПДК, включая отношение фактической концентрации к предельно допустимой и бинарный признак наличия/отсутствия превышения ПДК.

Как видно по рис. 2, превышение ПДК зафиксировано у Pb на всех участках, содержание других металлов на большом количестве участков также превышает ПДК (Cu, Zn). Cd на участках выше хвостохранилища превышает ПДК (пробы с ID 0-1), а ниже и на территории хвостохранилища — находится в допустимых пределах. Mn и Ni — не превышают норму.

Поскольку для анализа необходима не только констатация факта наличия превышения ПДК, но и изучение, и количественная оценка величины превышения, было вычислено отклонение от ПДК как отношение фактического со-

держания к ПДК. На рис. 3 представлены диаграммы размаха таких отклонений для каждого металла. Эти диаграммы необходимы для визуализации и анализа кратности превышения ПДК.

Анализ диаграмм размаха (см. рис. 3) позволяет отметить разный разброс значений для каждого из металлов, обусловленный неоднородным составом проб и разной концентрацией загрязняющих элементов. Для металлов Cu, Zn, Cd характерно наличие превышений значений ПДК после 75 квартиля (2 пробы находятся либо на верхней границе диаграммы размаха, либо в области выбросов). Это свидетельствует об их взаимосвязи.

РСА был проведен для того, чтобы определить изменчивость загрязнения почвенного покрова комплексно (по всем 6 элементам).

При РСА исходные данные концентрации химических элементов (Cu, Mn, Ni, Pb, Zn, Cd) были нормализованы и перестроены в пространство для того, чтобы выделить главные направления изменчивости. На рис. 4 представлен

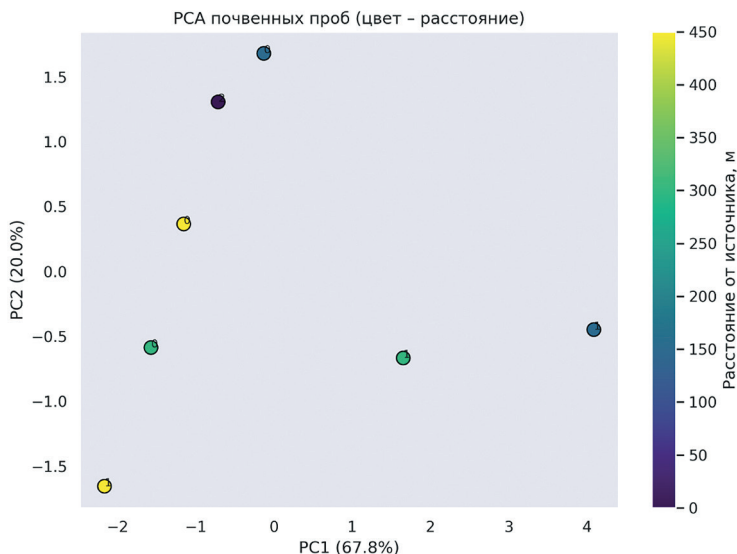


Рис. 4. Анализ главных компонент (PCA) в зависимости от расстояния от источника загрязнения
Fig. 4. Principal component analysis (PCA) as a function of distance from the pollution source

график, где PC1 (горизонтальная ось) — это направление, вдоль которого данные отличаются сильнее всего. Первая компонента PC1 объясняет наибольшую долю общей изменчивости (68,7%). PC2 (вертикальная ось) — второе по важности направление (оставшаяся изменчивость — 20%). Каждая точка на графике — это одна проба почвы, спроецированная на эти две главные оси (см. рис. 4). Координаты точек — это не исходные концентрации, а комбинированные показатели, которые учитывают все 6 элементов (Cu, Mn, Ni, Pb, Zn, Cd) сразу.

PCA для 7 почвенных проб представлены на том же рисунке. Оси PC1 и PC2 — это новые координаты, которые являются линейными комбинациями исходных переменных (концентраций Cu, Mn, Ni, Pb, Zn, Cd). Они построены так, чтобы максимизировать дисперсию (разброс) данных. Проценты рядом с осями показывают, какую часть общей дисперсии данных объясняет каждая главная компонента. PC1 объясняет 67,8% изменчивости, PC2 — 20%.

В сумме две компоненты описывают почти 90% различий между пробами.

В правой части графика (PC1 ≈ 2 и 4) расположены точки с высокими концентрациями Cu, Zn, Cd, Ni, Mn и низким содержанием Pb. Такой элементный профиль характерен для проб, взятых вблизи хвостохранилища: здесь преобладает именно эта ассоциация металлов, типичная для отходов обогащения.

Точки в левой области (PC1 от -2 до 0) дают противоположную картину: концентрация Pb повышена, тогда как концентрации остальных металлов понижены. Подобное распределение свойственно фоновым либо удаленным пробам, где свинец имеет иное происхождение — возможно, атмосферные выбросы прошлых лет или естественный геохимический фон.

Что касается второй компоненты, положительные значения PC2 (>0) связаны с накоплением Mn и Ni и одновременным снижением концентраций Cd, Pb, Cu, Zn. Отрицательные значения PC2 (<0) демонстрируют противоположную закономерность: снижение

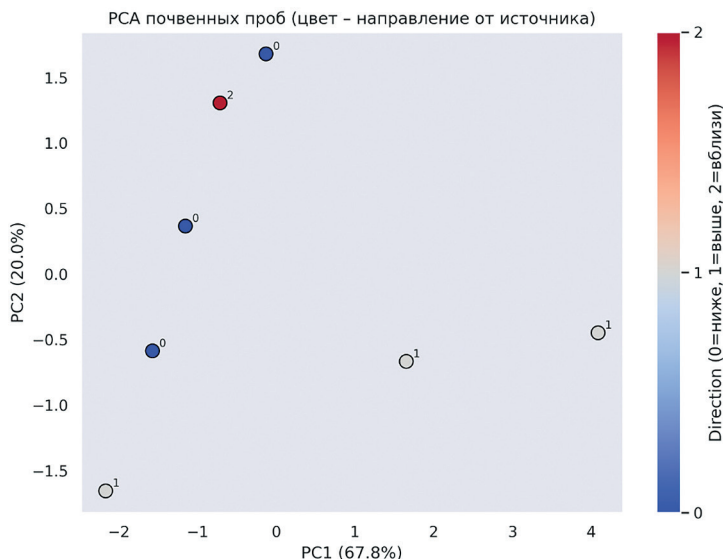


Рис. 5. Анализ главных компонент в зависимости от направления от источника загрязнения
 Fig. 5. Principal component analysis depending on the direction from the pollution source

Таблица 2

Результаты анализа главных компонент
Results of principal component analysis

Направление	Характерные координаты (PC1, PC2)	Химическая интерпретация
вблизи источника (2)	(-0,5; +1,3)	обогащение Pb, Mn, Ni; обеднение Cu, Zn, Cd
выше (1)	от (-2; -1,5) до (4; -0,3)	широкий диапазон: от чисто свинцовых пятен до экстремально высоких Cu-Zn-Cd, но везде понижены концентрации Mn и Ni
ниже (0)	отрицательные PC1	обогащение Pb

содержаний Mn и Ni на фоне накопления Cd, Pb, Cu, Zn. Таким образом, есть два кластера проб: «условно чистые» (5 проб) и «загрязненные» (2 пробы). При этом загрязненные пробы, вероятно, расположены ближе к хвостохранилищу (меньшее расстояние). Основным фактор загрязнения (PC1) связан с определенным набором элементов (скорее всего, Zn, Cu, Ni, Mn). Второй фактор (PC2) отражает особенности накопления марганца или никеля.

Было исследовано содержания металлов в зависимости от направления (выше/ниже/на территории). На рис. 5 представлены результаты анализа главных компонент, где цветовой шкалой обозначено направление от источника.

В табл. 2 представлены общие закономерности, выявленные при анализе главных компонент в зависимости от расстояния и направления.

Таким образом, PCA позволил выявить закономерности в содержании тяжелых металлов в почвенном покрове на территории и вблизи хвостохранилища. В направлении выше относительно источника загрязнения обнаружена высокая концентрация Cu-Zn-Cd, при том, что на поверхности рекультивированного хвостохранилища концентрация этих металлов в почве меньше. Для направления ниже источника загрязнения характерно высокое содержание свинца. Mn и Ni содержатся более всего в

непосредственной близости от источника, на расстоянии их концентрации значительно меньше.

Обсуждение результатов

В результате проведенного исследования было выявлено пространственное распределение загрязняющих веществ на территории и вблизи рекультивированного хвостохранилища. Максимальные концентрации Cu, Zn, Cd, Ni, Mn зафиксированы в направлении «выше» от хвостохранилища, что указывает на преимущественный перенос этих элементов с поверхности хвостохранилища вверх (против ожидаемого направления). Возможные причины: ветровой перенос, техногенное перемещение грунта при рекультивации, особенности рельефа.

На самом хвостохранилище концентрации Cu, Zn, Cd, Ni, Mn ниже, чем выше — возможно, из-за рекультивации (перекрытие чистым грунтом, выщелачивание).

В направлении «ниже» — минимальные значения (фоновые или близкие к фоновым).

По данным PCA, координата PC1, на которую приходится основная доля дисперсии, представляет собой контраст между группой Cu-Zn-Cd-Ni-Mn (положительные нагрузки) и свинцом (отрицательная нагрузка). Эту компоненту можно рассматривать как ось «хвосто-

хранилище — перенос выше»: положительные значения РС1 характерны для проб из зоны выше источника, где зафиксированы максимальные содержания перечисленных элементов. В свою очередь, РС2 разделяет Mn и Ni от остальных металлов. Такое разделение, вероятно, обусловлено различиями в подвижности этих элементов в щелочной среде (рН 7–9).

Выявленные закономерности указывают на высокую экологическую опасность исследуемой территории. В зоне «выше» хвостохранилища превышены ПДК для подвижных форм Cu, Zn, Cd, Ni.

При этом выявленное аномальное накопление меди, цинка, кадмия и никеля в пробах, отобранных выше хвостохранилища, на первый взгляд, противоречит логике водной миграции. Однако этот факт находит объяснение при анализе гранулометрического состава отходов. Согласно проведенным ранее авторским исследованиям, поверхность хвостохранилища состояла из слабоцементированных, преимущественно пылеватых фракций (0,05–0,25 мм). Именно эти частицы — носители основных ассоциаций тяжелых металлов — поднимались ветром уже при скоростях 4–5 м/с. В Алагирском ущелье преобладают горно-долинные ветры с устойчивой составляющей, направленной вверх по склону. Миграционная способность свинца имеет другие особенности: его меньшая аэродинамическая подвижность обусловлена более высокой плотностью и сорбцией на крупных частицах, что и приводит к накоплению Pb непосредственно в теле хвостохранилища и в прилегающей нижней зоне. Недоучет ветровой составляющей при

проектировании хвостохранилища и на этапе рекультивации сформировал вторичные ореолы рассеяния выше источника. Из этого следует, что роза ветров должна рассматриваться как критический параметр при планировании постмониторинга.

Заключение

Для рекультивированного хвостохранилища стандартные представления о миграции загрязнителей исключительно вниз по рельефу не работают. Максимальные концентрации Cu, Zn, Cd и Ni зафиксированы не на самом объекте, а на участках «выше» по склону, что прямо указывает на доминирование ветрового переноса мелкодисперсной пыли. Организация постмониторинга требует пересмотра: контрольные точки не могут закладываться только по направлению водного стока; необходимо учитывать розу ветров и закреплять поверхности, подверженные дефляции. Разнонаправленность геохимического поведения свинца и группы Cu–Zn–Cd показывает, что опора на один «индикаторный» металл недостаточна, а перечень анализируемых элементов должен быть расширен. Применение метода главных компонент позволило объяснить 86% дисперсии данных и выделить два скрытых фактора загрязнения — задача, неразрешимая при разрозненных измерениях. Повышение эффективности мониторинга выведенных из эксплуатации объектов требует перехода от эпизодического отбора проб к системному анализу с использованием многомерных статистических методов. Только такой подход обеспечивает своевременное выявление аномальных зон и корректировку природоохранных мероприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Моргоева А. Д., Манджиева С. С., Киричков М. В., Соколов А. А. Исследование моделей машинного обучения для оценки влияния угольных горно-энергетических предприятий на эко-

- системы // Устойчивое развитие горных территорий. — 2024. — Т. 16. — № 3. — С. 1130–1143. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-3-1130-1143
2. *Моргоева А. Д., Соколов А. А., Шепелев И. И., Фоменко В. А.* Исследование распределения загрязняющих веществ, содержащихся в отходах обогащения, выведенных из эксплуатации хвостохранилища // Устойчивое развитие горных территорий. — 2025. — Т. 17. — № 3. — С. 1354–1364. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-3-1354-1364.
3. *Моргоева А. Д., Соколов А. А., Манджиева С. С.* Перспективы применения машинного обучения для мониторинга загрязнения почвенного покрова тяжелыми металлами / Проблемы автоматизации. Региональное управление. Связь и акустика: Сборник трудов XIII Всероссийской научной конференции и молодежного научного форума. — Ростов-на-Дону—Таганрог: ЮФУ, 2024. — С. 390–394.
4. *Размахнин К. К., Торосян Э. С.* Оценка уровня негативного воздействия предприятий по добыче мергеля и производства цемента на окружающую среду Краснодарского края // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2025. — № 11. — С. 49–63. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_11_0_49.
5. *Куликова Е. Ю., Баловцев С. В., Скопинцева О. В.* Комплексная оценка геоэкологических рисков при ведении открытых и подземных горных работ // Устойчивое развитие горных территорий. — 2024. — Т. 16. — № 1. — С. 205–216. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-205-216.
6. *Елизарьев А. Н., Папян Э. Э., Тараканов Д. А., Мансуров В. Н.* Экологическая оценка загрязненной тяжелыми металлами почвы в результате разработки медно-колчеданных руд // Экология и промышленность России. — 2025. — Т. 29. — № 12. — С. 66–71. DOI: 10.18412/1816-0395-2025-12-66-71.
7. *Крупская Л., Куликова Е., Филатова М., Леоненко А.* Оценка воздействия техногенной системы на воздушный бассейн с применением методов математической статистики // Экология и промышленность России. — 2023. — Т. 27. — № 8. — С. 50–57. DOI: 10.18412/1816-0395-2023-8-50-57.
8. *Клюев Р. В.* Геоэкологические аспекты и природоохранные технологии при цианидном выщелачивании на золотоизвлекательных фабриках // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2026. — № 3. — С. 5–17. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_3_0_5.
9. *Ramírez A. J., Claramunt A. T., Villacura M. L., Massimi L., Leiva-Guzmán M. A., Toro A. R.* Source apportionment and diurnal dynamics from quasi real-time measurements of potentially toxic elements in PM10 in a coastal industrial zone // *Urban Climate*. 2026, no. 67, article 102866. DOI: 10.1016/j.uclim.2026.102866.
10. *Acharya A., Tunga C., Banerjee S., Basu R., Ghosh S., Mondal G., Kumar S., Chakraborty S., Gorai G., Tripathi S.* Deciphering stone mining-induced hazardous heavy metal contamination in agricultural soils using source attribution, health-dietary risk analysis, and machine learning-driven insights // *Environmental Geochemistry and Health*. 2026, vol. 48, no. 6, article 280. DOI: 10.1007/s10653-026-03167-y.
11. *Kozdrój J., Frączek K., Górny R. L., Ropek D. R.* Soil sustainability around municipal waste landfill area is affected by microbial contamination // *Sustainability (Switzerland)*. 2026, vol. 18, no. 6, article 2846. DOI: 10.3390/su18062846.
12. *Shao Y., Yan B., Zhang K., Zhang B., Zhang Y., Li B., Chen Y., Xiang F., Zhuang X., Guo S.* Distribution, environmental risks, and source apportionment of heavy metals in the lake sediments and riparian soils in Bangong Co Lake of the Qinghai–Tibet Plateau in China // *Sustainability (Switzerland)*. 2025, vol. 17, no. 24, article 11274. DOI: 10.3390/su172411274.
13. *Tan J., Chen Y., Shi W., Li J., Hou Z., Zhang J., Pan D., Zhang Y., Chen X.* Early warning study on ecological risk of heavy metals in soil based on XGBoost-IER coupled model – A case study of black soil area in Jilin province // *Ecological Indicators*. 2026, vol. 182, article 114554. DOI: 10.1016/j.ecolind.2025.114554.
14. *Dasari B. M., Aradhi K. K.* Depth-resolved distribution and multivariate source apportionment of heavy metals in soils influenced by hydraulic fracturing activities in the Krishna–Godavari Onshore Basin, India // *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. 2026, vol. 90, no. 1, article 2. DOI: 10.1007/s00244-025-01178-x.
15. *Shi M., Wang C., Wang J., Zhong C., Zhao Y.* Quantifying heavy metal(loid)s sources in subtropical soils and assessing key determinants of their bioavailability: insights from the Yangtze River

Delta, China // *Plant and Soil*. 2026, vol. 518, no. 2, pp. 2015–2035. DOI: 10.1007/s11104-025-08115-w.

16. Kala D., Bayari E. E., Pedavoah M.-M., Oluayinka O. A. Contamination status and potential ecological risk assessment of soil heavy metals at central magazine, Wa, North-Western Ghana // *Environmental Geochemistry and Health*. 2026, vol. 48, no. 1, article 35. DOI: 10.1007/s10653-025-02777-2.

17. Smagin S., Ozarya Y., Usikov V., Smagin A., Tsygulev K., Sekrieru R., Orlov S., Kozhevnikova T. Automation of remote environmental monitoring of mineral resource complex facilities in Khabarovsk krai // *Informatics and Automation*. 2025, vol. 24, no. 6, pp. 1587–1622. DOI: 10.15622/ia.24.6.3.

18. Серянина А. В., Овчинникова Т. И., Тертычная С. В. К вопросу об экологической безопасности в металлургической промышленности // *Безопасность труда в промышленности*. – 2024. – № 8. – С. 23–28. DOI: 10.24000/0409-2961-2024-8-23-28.

19. Шабанов М. В., Маричев М. С., Киричков М. В., Цицуашвили В. С., Манджиева С. С. Экологические риски, лабильность и биодоступность меди и цинка в почвах Соймоновской долины (г. Карабаш) // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2026. – № 2. – С. 112–127. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_2_0_112.

20. Halmos L., Delgado-Rodríguez J., Rodríguez-Rodríguez M., Jiménez-Bonilla A., Díaz-Azpiroz M. Correction to: Geochemical evolution and elemental behaviour of playa sediments: impacts of natural weathering and agricultural practices // *Journal of Iberian Geology*. 2025, vol. 51, no. 4, pp. 707–709. DOI: 10.1007/s41513-025-00322-9. **MIAB**

REFERENCES

1. Morgoeva A. D., Mandzhieva S. S., Kirichkov M. V., Sokolov A. A. Machine learning models study for assessing the effect of coal mining and energy enterprises on ecosystems. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024, vol. 16, no. 3, pp. 1130–1143. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-3-1130-1143

2. Morgoeva A. D., Sokolov A. A., Shepelev I. I., Fomenko V. A. Research of the pollutants distribution contained in the waste from the enrichment of a decommissioned tailings pool. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2025, vol. 17, no. 3, pp. 1354–1364. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-3-1354-1364.

3. Morgoeva A. D., Sokolov A. A., Mandzhieva S. S. Prospects of using machine learning to monitor soil contamination with heavy metals. *Problemy avtomatizatsii. Regional'noe upravlenie. Svyaz' i akustika: Sbornik trudov XIII Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii i molodezhnogo nauchnogo foruma* [Problems of automation. Regional management. Communications and Acoustics : Proceedings of the XIII All-Russian Scientific Conference and Youth Scientific Forum], Rostov-na-Donu – Taganrog, 2024, pp. 390–394. [In Russ].

4. Razmakhnin K. K., Torosyan E. S. Evaluation of environmental impact of marl mining and cement production in the Krasnodar Krai. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025, no. 11, pp. 49–63. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_11_0_49.

5. Kulikova E. Yu., Balovtsev S. V., Skopintseva O. V. Comprehensive assessment of geoecological risks in conducting open and underground mining. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024, vol. 16, no. 1, pp. 205–216. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-205-216.

6. Elizaryev A. N., Papyan E. E., Tarakanov D. A., Mansurov V. N. Environmental assessment of soil contaminated with heavy metals from copper-pyrite ore mining. *Ecology and Industry of Russia*. 2025, vol. 29, no. 12, pp. 66–71. [In Russ]. DOI: 10.18412/1816-0395-2025-12-66-71.

7. Krupskaya L., Kulikova E., Filatova M., Leonenko A. A mathematical model for assessing the impact of a man-made system on an air basin. *Ecology and Industry of Russia*. 2023, vol. 27, no. 8, pp. 50–57. [In Russ]. DOI: 10.18412/1816-0395-2023-8-50-57.

8. Klyuev R. V. Geoeological aspects and environmental technologies in gold cyanidation at gold recovery plants. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026, no. 3, pp. 5–17. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_3_0_5.

9. Ramírez A. J., Claramunt A. T., Villacura M. L., Massimi L., Leiva-Guzmán M. A., Toro A. R. Source apportionment and diurnal dynamics from quasi real-time measurements of potentially toxic elements in PM10 in a coastal industrial zone. *Urban Climate*. 2026, no. 67, article 102866. DOI: 10.1016/j.uclim.2026.102866.

10. Acharya A., Tunga C., Banerjee S., Basu R., Ghosh S., Mondal G., Kumar S., Chakraborty S., Gorai G., Tripathi S. Deciphering stone mining-induced hazardous heavy metal contamination in agricultural soils using source attribution, health-dietary risk analysis, and machine learning-driven insights. *Environmental Geochemistry and Health*. 2026, vol. 48, no.6, article 280. DOI: 10.1007/s10653-026-03167-y.

11. Kozdrój J., Frączek K., Górny R. L., Ropek D. R. Soil sustainability around municipal waste landfill area is affected by microbial contamination. *Sustainability (Switzerland)*. 2026, vol. 18, no. 6, article 2846. DOI: 10.3390/su18062846.

12. Shao Y., Yan B., Zhang K., Zhang B., Zhang Y., Li B., Chen Y., Xiang F., Zhuang X., Guo S. Distribution, environmental risks, and source apportionment of heavy metals in the lake sediments and riparian soils in Bangong Co Lake of the Qinghai – Tibet Plateau in China. *Sustainability (Switzerland)*. 2025, vol. 17, no. 24, article 11274. DOI: 10.3390/su172411274.

13. Tan J., Chen Y., Shi W., Li J., Hou Z., Zhang J., Pan D., Zhang Y., Chen X. Early warning study on ecological risk of heavy metals in soil based on XGBoost-IER coupled model – A case study of black soil area in Jilin province. *Ecological Indicators*. 2026, vol. 182, article 114554. DOI: 10.1016/j.ecolind.2025.114554.

14. Dasari B. M., Aradhi K. K. Depth-resolved distribution and multivariate source apportionment of heavy metals in soils influenced by hydraulic fracturing activities in the Krishna – Godavari Onshore Basin, India. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. 2026, vol. 90, no. 1, article 2. DOI: 10.1007/s00244-025-01178-x.

15. Shi M., Wang C., Wang J., Zhong C., Zhao Y. Quantifying heavy metal(loid)s sources in subtropical soils and assessing key determinants of their bioavailability: insights from the Yangtze River Delta, China. *Plant and Soil*. 2026, vol. 518, no. 2, pp. 2015 – 2035. DOI: 10.1007/s11104-025-08115-w.

16. Kala D., Bayari E. E., Pedavoah M.-M., Oluayinka O. A. Contamination status and potential ecological risk assessment of soil heavy metals at central magazine, Wa, North-Western Ghana. *Environmental Geochemistry and Health*. 2026, vol. 48, no. 1, article 35. DOI: 10.1007/s10653-025-02777-2.

17. Smagin S., Ozarya Y., Usikov V., Smagin A., Tsygulev K., Sekrieru R., Orlov S., Kozhevnikova T. Automation of remote environmental monitoring of mineral resource complex facilities in Khabarovsk krai. *Informatics and Automation*. 2025, vol. 24, no. 6, pp. 1587 – 1622. DOI: 10.15622/ia.24.6.3.

18. Seryanina A. V., Ovchinnikova T. I., Tertychnaya S. V. On the issue of environmental safety in the metallurgical industry. *Occupational Safety in Industry*. 2024, no. 8, pp. 23 – 28. [In Russ]. DOI: 10.24000/0409-2961-2024-8-23-28.

19. Shabanov M. V., Marichev M. S., Kirichkov M. V., Tsitsuashvili V. S., Mandzhieva S. S. Eco-risks, lability and bioavailability of copper and zinc in soils of the Soimonov Valley, Karabash. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026, no. 2, pp. 112 – 127. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_2_0_112.

20. Halmos L., Delgado-Rodríguez J., Rodríguez-Rodríguez M., Jiménez-Bonilla A., Díaz-Azpiroz M. Correction to: Geochemical evolution and elemental behaviour of playa sediments: impacts of natural weathering and agricultural practices. *Journal of Iberian Geology*. 2025, vol. 51, no. 4, pp. 707 – 709. DOI: 10.1007/s41513-025-00322-9.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Моргоева Анжелика Джабраиловна – ассистент кафедры,
Северо-Кавказский горно-металлургический институт
(государственный технологический университет),
e-mail: m.angelika-m@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0003-2949-1993,
Соколова Софья Андреевна¹ – студент,
e-mail: sosoko@sfedu.ru, ORCID ID: 0009-0002-4014-0887,
Меженков Антон Александрович¹ – старший преподаватель,
e-mail: mezenkov@sfedu.ru, ORCID ID: 0000-0002-5733-8796,
Болдырева Вероника Эдуардовна¹ – доцент,
e-mail: veboldyreva@sfedu.ru, ORCID ID: 0000-0003-0233-5077,

Литвинов Юрий Алексеевич¹ – доцент,
e-mail: uyalitvinov@sfedu.ru, ORCID ID: 0000-0001-7204-2734,
¹ Академия биологии и медицины им. Д.И. Ивановского,
Южный федеральный университет.
Для контактов: Моргоева А.Д., e-mail: m.angelika-m@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.D. Morgoeva, Assistant of Chair, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia, e-mail: m.angelika-m@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0003-2949-1993,
S.A. Sokolova¹, Student, e-mail: sosoko@sfedu, ORCID ID: 0009-0002-4014-0887,
A.A. Mezhenkov¹, Senior Lecturer, e-mail: mezhenkov@sfedu.ru, ORCID ID: 0000-0002-5733-8796,
V.E. Boldyreva¹, Associate Professor, e-mail: veboldyreva@sfedu.ru, ORCID ID: 0000-0003-0233-5077,
Y.A. Litvinov¹, Associate Professor, e-mail: uyalitvinov@sfedu.ru, ORCID ID: 0000-0001-7204-2734,
¹ Academy of Biology and Medicine, Southern Federal University, 344090, Rostov-on-Don, Russia.
Corresponding author: A.D. Morgoeva, e-mail: m.angelika-m@yandex.ru.

Получена редакцией 05.04.2026; получена после рецензии 10.05.2026; принята к печати 10.07.2026.
Received by the editors 05.04.2026; received after the review 10.05.2026; accepted for printing 10.07.2026.



ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ
(специальный выпуск), смотри на www.gornaya-kniga.ru

НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ
ДЛЯ РЕКУЛЬТИВАЦИИ НАРУШЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ В ГОРНО-ТАЕЖНОЙ ПОДЗОНЕ
КЕМЕРОВСКОЙ ОБЛАСТИ – КУЗБАССА
(2026, № 3, СВ 7, 40 с.)

Семина Ирина Сергеевна – канд. биол. наук, доцент, Сибирский государственный
индустриальный университет, e-mail: semina.i@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-9222-0358.

SCIENTIFIC JUSTIFICATION OF RATIONAL USE OF NATURAL RESOURCES
FOR RECULTIVATION OF DISTURBED LAND IN THE MOUNTAIN-TAIGA SUBZONE
OF THE KEMEROVO REGION – KUZBASS

I.S. Semina, Cand. Sci. (Biol.), Assistant Professor, Siberian State Industrial University,
654007, Novokuznetsk, Russia, e-mail: semina.i@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-9222-0358.