

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ РЕКУЛЬТИВИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ХВОСТОХРАНИЛИЩА ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ

Т.В. Пучкова¹, Ю.И. Рогозов², Д.А. Плахотин¹, А.С. Лукьянов³, А.А. Соколов¹

¹ Филиал Южного федерального университета в г. Геленджике,
Геленджик, Россия, e-mail: anso@sfnu.ru

² ИКТИБ Южного федерального университета г. Таганрог, Таганрог, Россия

³ Открытый университет экономики, управления и права, Москва, Россия

Аннотация: Рекультивированные хвостохранилища горно-обогатительной промышленности остаются долговременными источниками вторичного загрязнения, однако традиционный мониторинг не интегрирует данные в пространственные модели и не учитывает дифференцированную токсикологическую опасность тяжелых металлов. Для компьютерного моделирования была реализована разработка геоинформационного дашборда на платформе Яндекс.DataLens для автоматизированного расчета модифицированного взвешенного индекса суммарного загрязнения биоты ($ИЗБ_{взв}$) по данным мониторинга растительности Унальского хвостохранилища (56 точек, 6 металлов). Методология включает нормализацию концентраций по ПДК, введение весовых коэффициентов ($w = 3$ для I класса опасности – Cd, Pb, Zn; $w = 2$ для II – Ni, Cu; $w = 1$ для III – Mn) и расчет индекса через вычисляемые поля в облачной ГИС. Значения $ИЗБ_{взв}$ варьируют от 8,5 до 109,0 (среднее 36,15), подтверждая высокую пространственную неоднородность загрязнения. В точках с максимальным индексом доминируют тяжелые металлы I класса, что свидетельствует о вертикальной миграции поллютантов. В отличие от классического ИЗБ, предложенный модифицированный индекс корректно отражает вклад чрезвычайно опасных элементов и может служить основой для создания «цифровых двойников» хвостохранилищ в системах поддержки принятия решений.

Ключевые слова: тяжелые металлы, хвостохранилище, индекс загрязнения биоты, ГИС, мониторинг, рекультивация, весовые коэффициенты, класс опасности, Яндекс.DataLens.

Благодарность: Исследования выполнены в Южном федеральном университете за счет средств Российского научного фонда (проект № РНФ/23-37-ГЛ, № 23-77-00015).

Для цитирования: Пучкова Т. В., Рогозов Ю. И., Плахотин Д. А., Лукьянов А. С., Соколов А. А. Компьютерное моделирование и интегральная оценка загрязнения растительности рекультивированной поверхности хвостохранилища тяжелыми металлами // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 8. – С. 92–103. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_8_0_92.

Computer modeling and integrated evaluation of vegetation contamination with heavy metals on tailings dam surfaces after reclamation

T.V. Puchkova¹, Yu.I. Rogozov², D.A. Plakhotin¹, A.S. Lukyanov³, A.A. Sokolov¹

¹ Branch of Southern Federal University in Gelendzhik, Gelendzhik, Russia, e-mail: anso@sfedu.ru

² ICTIS Branch of Southern Federal University Taganrog, Taganrog, Russia

³ Open University of Economics, Management and Law, Moscow, Russia

Abstract: Reclaimed tailings dams of the mining and processing industry remain the secondary pollution sources for a long time. Conventional monitoring never integrates the obtained data into spatial models and neglects differentiated toxicological hazard of heavy metals. For the computer modeling purposes, a geoinformation dashboard was designed in Yandex DataLens for the computerized analysis of a modified Weighted Biotic Index (BIw) using the monitoring data of vegetation at the Unaly Tailings Dam (56 points, 6 types of metals). The methodology includes normalization of concentrations by the maximum allowable concentration, introduction of weighting factors ($w=3$ for hazard class I — Cd, Pb, Zn; $w=2$ for hazard class II — Ni, Cu; $w=1$ for hazard class III — Mn), and computation of BIw in terms of the calculated field in cloud GIS. The values of BIw range from 8.5 to 109.0 (average 36.15), which confirms high spatial nonuniformity of contamination. At the points with the maximal value of BIw, heavy metals of class I dominate, which is reflective of vertical migration of pollutants. As against the classic BI, the proposed modified index adequately reflects contribution of extremely hazardous elements and can provide a ground for the creation of digital twins of tailings dams in decision support systems.

Key words: heavy metals, tailings dam, Biota Index, GIS, monitoring, reclamation, weighting factors, hazard class, Yandex DataLens.

Acknowledgements: The studies were carried out at the Southern Federal University and were supported by the Russian Science Foundation, Projects Nos. RNF/23-37-GL and 23-77-00015.

For citation: Puchkova T. V., Rogozov Yu. I., Plakhotin D. A., Lukyanov A. S., Sokolov A. A. Computer modeling and integrated evaluation of vegetation contamination with heavy metals on tailings dam surfaces after reclamation. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(8):92-103. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_8_0_92.

Введение

На практике контроль за состоянием бывших горнопромышленных объектов, особенно рекультивированных хвостохранилищ, часто сводится к формальному сбору показателей. Данные оседают в ведомственных отчетах, не переходя в единую аналитическую среду. Из-за этого трудно проследить, как тяжелые металлы перемещаются в цепочке «отходы — почва — растение», и тем более — построить достоверный прогноз. Между тем, как недавно показано [1 — 3], законсервированные накопители отходов

не застывают в стабильном состоянии. Они продолжают функционировать как природно-техногенные системы: внешние факторы (осадки, ветер, сейсмические толчки) накладываются на внутренние (сульфидные остатки, тиксотропию, остаточную токсичность) [4 — 6]. В итоге формируются вторичные ореолы загрязнения, причем опасность часто носит кумулятивный характер — суммарный эффект от нескольких металлов оказывается выше простой суммы их отдельных вкладов в техногенную нагрузку на окружающую экосистему [7, 8].

Материалы и методы

В современной практике экологического мониторинга предпринимаются попытки комплексной оценки загрязнения тяжелыми металлами с использованием многомерных индексов, а также путем комбинирования различных методов [9–11]. Однако даже такой многосторонний анализ не позволяет в полной мере отразить интегральный уровень загрязнения [12, 13], поскольку отсутствие весовых коэффициентов, учитывающих класс опасности элементов, искажает реальный вклад высокотоксичных поллютантов [14], нивелируя экологическую опасность свинца и кадмия [15]. Кроме того, пространственная визуализация полученных данных, как правило, остается статичной и не интегрируется в оперативные инструменты поддержки принятия решений [16–18], тогда как существующие веб-платформы уже демонстрируют высокий потенциал интерактивного мониторинга [19, 20].

Для преодоления указанных ограничений авторы статьи намеренно отошли от традиционной схемы, где главным результатом считается простое перечисление точек с превышением ПДК. В основе методологии лежит многоуровневый мониторинг, которая реализована применительно к растительности — одному из самых чувствительных

индикаторов. Главное методическое отличие: перенос всей логики расчета взвешенного индекса *ИЗБ*^{взв} непосредственно в облачную ГИС-среду Яндекс. DataLens, что не просто автоматизирует вычисления, но и делает их полностью воспроизводимыми: при добавлении новых проб результаты пересчитываются сами. Такой прием позволяет уйти от разрыва между полевыми замерами и пространственным анализом, который неизбежен при использовании обычных электронных таблиц. Вместо статичного перечня чисел мы получаем оперативно обновляемые карты зон экологического риска, где каждая точка привязана к конкретным координатам и интегральной оценке.

Объектом исследования является Унальское хвостохранилище, расположенное вблизи пос. Верхний Унал в Северной Осетии. Растительный покров на поверхности и в непосредственной близости от объекта, представленный преимущественно пионерными видами травянистой и кустарниковой растительности, носит мозаичный характер и служит важнейшим индикатором процессов миграции и фиксации тяжелых металлов (ТМ) в окружающей среде.

Основой исследования послужили исследования в рамках проекта РНФ, включающие результаты определения валового содержания ТМ в пробах рас-

Диапазоны содержания тяжелых металлов в растительности на территории Унальского хвостохранилища

Ranges of heavy metal concentrations in vegetation at the Unalskoye tailings pond

Металл	Min, мг/кг	Max, мг/кг	Среднее, мг/кг	ПДК, мг/кг
Pb	3,74	80,73	19,37	3,3
Cd	0,10	4,50	0,54	0,2
Zn	46,99	339,80	161,57	44,9
Cu	2,86	14,21	5,68	7,4
Ni	0,92	5,30	1,50	2
Mn	32,01	285,31	114,04	70

тительности, отобранных на территории хвостохранилища во время экспедиций за период с 2022 по 2025 гг. Исходные диапазоны содержания металлов представлены в табл. 1.

В качестве методологической основы для интегральной оценки в работе был выбран индекс суммарного загрязнения биоты (ИЗБ), который в соответствии с СанПиНом 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» рассчитывается по формуле

$$\text{ИЗБ} = \sum \left(\frac{C_i}{\text{ПДК}_i} \right) - (n-1), \quad (1)$$

где C_i – содержание металла в пробе; ПДК_i – предельно допустимая концентрация для растительной продукции; n – число учитываемых металлов.

Для более адекватной оценки, учитывающей гигиеническую значимость элементов, в данной работе использована модифицированная (взвешенная) формула интегрального показателя:

$$\text{ИЗБ}_{\text{взв}} = \sum \left(w_i \cdot \frac{C_i}{\text{ПДК}_i} \right) - (n-1), \quad (2)$$

где w_i – весовой коэффициент, отражающий класс опасности i -го металла согласно отечественной гигиенической классификации СанПиН 2.1.7.1287-03 «Санитарно-эпидемиологические требования к качеству почвы и грунтов». Система взвешивания была построена на принципе пропорционального увеличения вклада элемента в интегральный индекс в соответствии с повышением класса его опасности. Коэффициенты были назначены следующим образом:

а) $w = 3,0$ для элементов I класса опасности (чрезвычайно опасные: Cd, Pb, Zn);

б) $w = 2,0$ для элементов II класса опасности (высокоопасные: Ni, Cu);

в) $w = 1,0$ для элементов III класса опасности (умеренно опасные: Mn).

Таким образом, в предлагаемой модели элемент I класса опасности учитывается в интегральной оценке с весом, в 3 раза превышающим вес элемента III класса, и в 1,5 раза – вес элемента II класса.

Алгоритм расчета интегрального показателя для точечных данных включает следующие шаги:

1) нормализация и взвешивание для каждой пробы растительности (точки замера j) и каждого металла i с расчетом безразмерного взвешенного коэффициента превышения (K_{ij}) по формуле

$$K_{ij} = w_i \cdot \frac{C_{ij}}{\text{ПДК}_i}, \quad (3)$$

где C_{ij} – измеренная концентрация металла i в пробе j , а w_i – весовой коэффициент по классу опасности.

2) расчет точечного значения $\text{ИЗБ}_{\text{взв}}$ для каждой точки замера j по модифицированной формуле

$$\text{ИЗБ}_{\text{взв}_j} = \sum_i (K_{ij}) - (n-1), \quad (4)$$

где суммирование проводится по всем n металлам.

В результате для каждой географической привязанной пробы было получено значение интегрального показателя, отражающее комплексную техногенную нагрузку в данной точке. Детальные значения показателя в точках отбора проб приведены в табл. 2.

Для интерпретации результатов дополнительно рассчитывался относительный вклад каждого металла в интегральный показатель.

Доля i -го элемента (D_i , %) определялась как отношение его взвешенного коэффициента K_i к сумме всех коэффициентов:

$$D_{ij} = \frac{K_{ij}}{\sum_i K_{ij}} \cdot 100. \quad (5)$$

Таблица 2

Результаты расчета интегрального показателя в каждой точке замера
Calculated values of the integral index at each sampling point

Координаты		ИЗБ _{взв}	Координаты		ИЗБ _{взв}
42,869979	44,150958	8,465	42,871309	44,155142	19,087
42,869206	44,150876	20,356	42,871541	44,154750	29,823
42,868430	44,150071	14,026	42,871558	44,154261	29,450
42,867629	44,149504	40,600	42,871538	44,153779	92,852
42,867234	44,149329	38,837	42,871630	44,153203	27,385
42,866689	44,149210	28,172	42,871305	44,152739	47,373
42,866689	44,149210	25,262	42,870908	44,152326	37,581
42,866058	44,148912	30,880	42,878679	44,151981	47,948
42,865700	44,148757	25,485	42,870395	44,151603	92,095
42,866194	44,149532	38,551	42,870233	44,151377	65,099
42,866158	44,150060	26,718	42,868500	44,151823	88,575
42,866012	44,150517	23,390	42,869446	44,152116	71,093
42,866149	44,150964	15,864	42,869979	44,152561	15,850
42,866371	44,151517	31,316	42,870962	44,153072	41,839
42,866666	44,151930	90,642	42,868825	44,152613	10,192
42,866961	44,152354	7,996	42,869584	44,153653	17,476
42,867207	44,152710	27,752	42,870098	44,154610	23,745
42,867366	44,153121	13,605	42,867839	44,151022	60,319
42,867752	44,153442	23,779	42,867268	44,150260	26,600
42,868006	44,153759	19,420	42,867588	44,151598	21,656
42,868447	44,154061	42,788	42,866764	44,151176	41,202
42,868730	44,154338	17,917	42,867584	44,151599	41,510
42,869058	44,154521	35,937	42,869218	44,151560	36,728
42,869485	44,154789	40,850	42,869473	44,151409	28,316
42,869853	44,154983	20,408	42,868940	44,151658	49,432
42,870200	44,155159	25,161	42,868578	44,151679	34,191
42,870632	44,155279	32,977	42,868504	44,152221	23,457
42,870632	44,155270	27,196	42,868483	44,152612	109,031

Расчет долевого вклада каждого металла (формула (5)) позволяет не просто констатировать факт загрязнения, а выявлять приоритетные поллютанты — то, ради чего, собственно, и ведется мониторинг. Однако сами по себе точечные значения $ИЗБ_{взв}$, сведенные в табл. 2, остаются статичным набором цифр. Для инженерной экологии этого мало: нужна не таблица, а рабочая среда, где

можно быстро отфильтровать точки, сравнить вклады металлов, увидеть пространственную картину и сформировать отчет без рутины в Excel или ГИС-приложениях.

В качестве такой среды выбрана среда Яндекс.DataLens. Исходный CSV-файл (координаты плюс концентрации шести металлов) загружается один раз; при загрузке координаты типизируются как

геоточки, концентрации — как числа. Все последующие преобразования — нормировка по ПДК, взвешивание по классам опасности, суммирование с поправкой $(n-1)$ — выполняются средствами встроенного языка формул на уровне датасета.

Кумулятивный эффект совместного присутствия металлов не сводится к сумме отношений их концентраций к ПДК. Введение весовых коэффициентов по классам опасности позволяет приблизить интегральную оценку к реальной токсикологической нагрузке. Точечные значения $ИЗБ_{взв}$ пригодны для последующего вариограммного анализа и кригинга. Перенос расчетной логики в облачную среду устраняет разрыв между полевыми измерениями и пространственным моделированием, исключая ручной перенос данных между программами и связанные с этим ошибки.

В итоге разработан прозрачный, контролируемый и масштабируемый инструмент: алгоритм открыт для проверки, веса коэффициентов можно менять при изменении нормативной базы, а при добавлении новых точек отбора индекс пересчитывается автоматически.

Все вычисляемые поля создаются на уровне датасета и автоматически пересчитываются для каждой записи при загрузке или обновлении данных. Это обеспечивает полную прозрачность алгоритма, исключает необходимость ручных расчетов во внешних приложениях и гарантирует воспроизводимость результатов. В качестве таких полей созданы:

- для каждого из шести металлов отдельное вычисляемое поле, реализующее формулу (3);

- поле SumK, представляющее собой сумму всех индивидуальных коэффициентов $\sum_i(K_{ij})$ и являющееся промежуточным результатом, необходимым для дальнейшего расчета как интегрального показателя, так и долевых вкладов;

- поле IZB как итоговое значение модифицированного индекса суммарного загрязнения биоты для каждой точки, рассчитанное по формуле (4) с учетом поправки на количество элементов;

- поля, отражающие относительный вклад каждого элемента в интегральный показатель (формула (5)), значения которых выражаются в процентах и в сумме для каждой точки составляют 100%, будут отображаться во всплывающих окнах при наведении курсором на конкретную точку отбора пробы.

Все перечисленные вычисляемые поля создаются однократно и не требуют дополнительного обслуживания. При добавлении новых данных (новых точек отбора или результатов повторных наблюдений) пересчет всех показателей выполняется автоматически, что обеспечивает оперативность и актуальность аналитической информации.

В дашборде (рис. 1) сделали несколько вкладок, чтобы можно было смотреть данные на разном уровне — от общей картины до деталей по каждому металлу. На первой вкладке — карта точек с цветной градацией по значению индекса $ИЗБ_{взв}$: от зеленого (норма) до красного (критический уровень). «Кликаешь» на любую точку — всплывает окошко: координаты, значение индекса и вклад каждого металла в процентах. Тут же справа столбчатый график с теми же долями. Все вместе помогает быстро понять, где нагрузка выше всего и за счет каких элементов.

Вторая вкладка «Zn, Cd, Pb (I класс опасности)» предназначена для детального анализа поведения металлов, представляющих наибольшую токсикологическую опасность (рис. 2). Она включает два типа визуализаций, синхронизированных по набору точек:

- 1) карта распределения концентраций, где для каждого из трех металлов (Zn, Cd, Pb) создан отдельный слой,

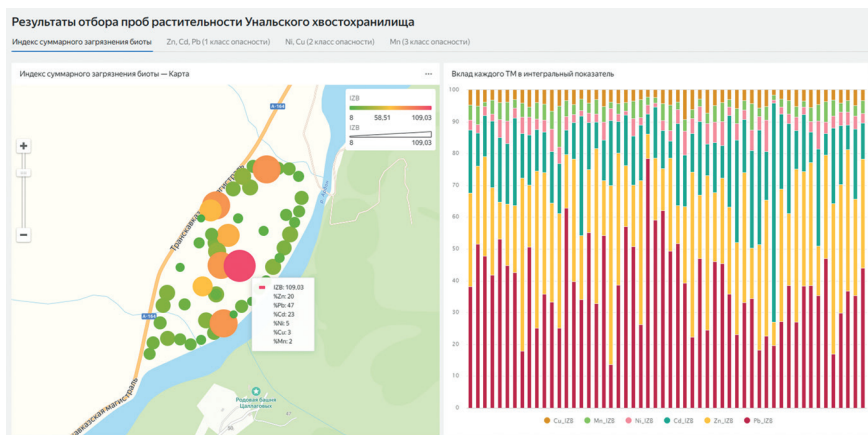


Рис. 1. Геоинформационный дашборд на платформе Яндекс.DataLens
 Fig. 1. Geoinformation dashboard on the Yandex.DataLens platform

на котором точки окрашены в соответствии с фактическим содержанием элемента. Пользователь может переключать отображаемый слой через селектор (значок глаза в подписи к карте), визуально оценивая пространственную структуру загрязнения по каждому металлу I класса. Цветовая шкала на карте настроена индивидуально для каждого элемента с учетом диапазона его концентраций на объекте;

2) комбинированные чарты (графики), на которых ось X соответствует точкам отбора (порядковым номерам),

а ось Y — концентрации. Здесь одновременно выведены фактическая концентрация металла в пробе (голубые столбцы) и значение ПДК (красная линия).

Такое представление позволяет наглядно оценить вклад каждого ТМ, а также сравнить поведение разных металлов I класса опасности между собой. Интерактивность графиков обеспечивает возможность выделения отдельных точек и просмотра точных значений концентраций.

Вкладка «Ni, Cu (II класс опасности)» построена по тому же принципу,

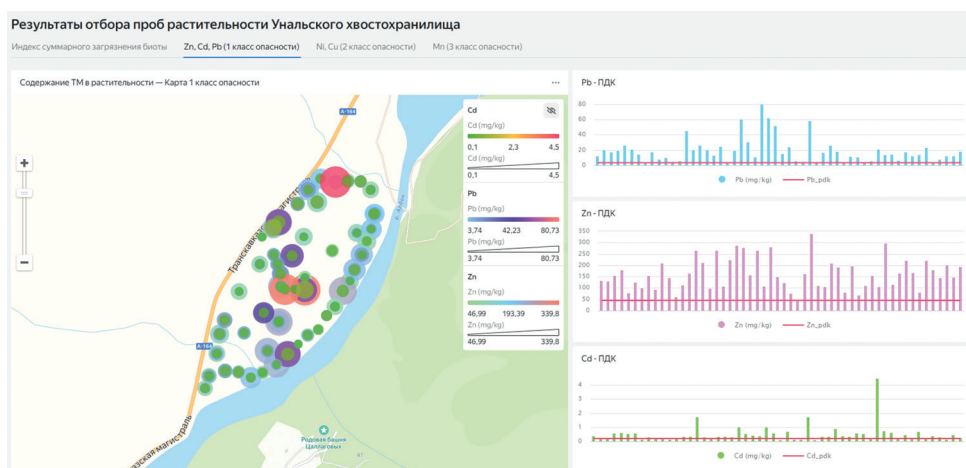


Рис. 2. Вкладка дашборда для оценки содержания тяжелых металлов I класса опасности
 Fig. 2. Dashboard tab for assessing the content of hazard class I HMs

что и предыдущая, но включает данные по металлам II класса опасности — никелю и меди. Пользователю доступны карта распределения концентраций Ni и Cu с возможностью переключения слоев и графики для каждого металла с отображением фактических концентраций и ПДК.

Четвертая вкладка содержит визуализацию данных по марганцу как единственному представителю III класса опасности в рассматриваемом перечне элементов. Аналогично предыдущим вкладкам, здесь представлены карта распределения концентраций Mn и столбчатый график сравнения с ПДК. Несмотря на меньшую токсикологическую опасность марганца по сравнению с элементами I и II классов, его включение в дашборд необходимо для формирования целостной картины загрязнения, поскольку в отдельных точках могут фиксироваться значительные концентрации данного элемента, способные влиять на интегральную оценку.

Разделение металлов по вкладкам в соответствии с классами опасности позволяет анализировать группы элементов, сходных по степени токсикологической значимости, и выявлять пространственные закономерности, характерные для каждой группы.

Результаты апробации и обсуждение

В результате проведенных исследований был разработан дашборд в среде Яндекс.DataLens <https://datalens.yandex/4wtp14khh7k8o?tab=qK>, который позволяет в режиме онлайн осуществлять анализ и оценку загрязнений растительности поверхности рекультивированного хвостохранилища. Примеры реализации технических возможностей компьютерного моделирования приведены на рис. 3.

На приведенном рис. 3, а четко визуализируются очаги с максимальными значениями интегрального показателя, выделяемые точками большего диаметра.

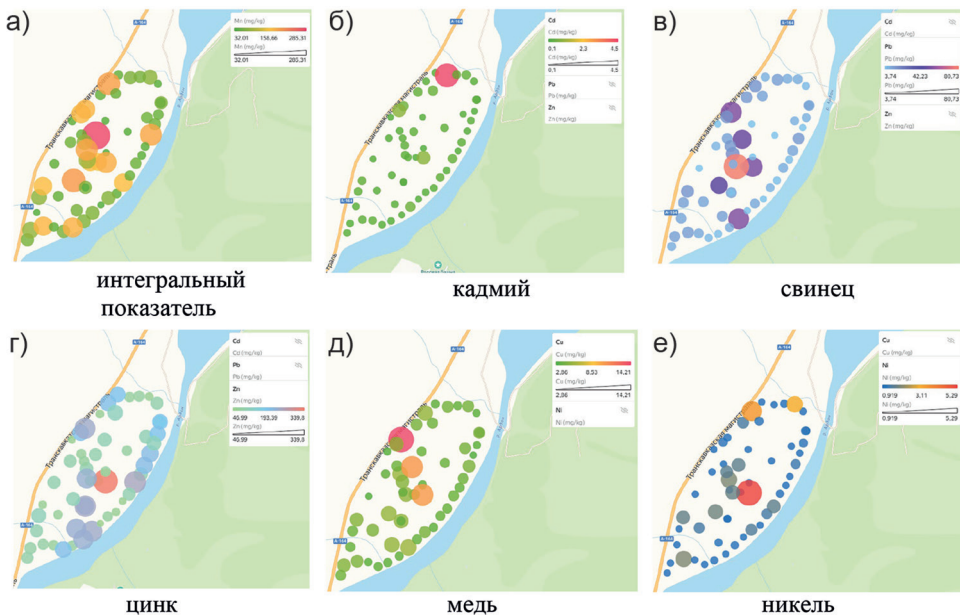


Рис. 3. Скриншоты реализации технических возможностей компьютерного моделирования
 Fig. 3. Screenshots illustrating the technical capabilities of computer modeling

ра. В основном, это вертикаль с севера на юг с отдельными точками на периферии. Аналогичная картина наблюдается и в распределении максимальных концентраций свинца, цинка и меди. Для кадмия также имеется вертикаль север — юг, но с выделением одной точки с чрезмерно высокой концентрацией данного ТМ в растениях. Характер распределения никеля имеет несколько другую картину — по диагонали северо-запад — юго-восток.

Описательные статистики интегрального показателя подтверждают наблюдаемую визуально неоднородность: $ИЗБ_{взв}$ изменяется от 8,5 до 109,0 при среднем значении $36,2 \pm 22,7$ и медиане 28,9. Полученные значения интегрального показателя $ИЗБ_{взв}$ свидетельствуют о высокой пространственной неоднородности техногенной нагрузки на растительный покров даже после завершения рекультивации. Выявленный разброс подтверждает теоретическое положение, сформулированное в работе [1]: законсервированные хвостохранилища продолжают эволюционировать как автономные природно-техногенные системы, где синергия внешних факторов (инfiltrация осадков, ветровая эрозия) и внутренних свойств отходов (сульфидная минерализация, остаточная токсичность) генерирует вторичные ореолы загрязнения. Особого внимания заслуживает тот факт, что в точках с максимальными значениями $ИЗБ_{взв}$ (до 109,0) доминирующий вклад вносят металлы I класса опасности — кадмий, свинец

и цинк, что прямо коррелирует с данными мониторинга подземных вод и подтверждает вертикальную миграцию поллютантов через нарушенный рекультивационный слой.

Заключение

С практической точки зрения, разработанный дашборд трансформирует статичную таблицу результатов (см. табл. 2) в динамический инструмент поддержки принятия решений. Для предприятия горной промышленности это означает возможность в реальном времени идентифицировать участки, требующие повторной рекультивации, и оценивать вклад каждого металла без дополнительного лабораторного пересчета. В более широком контексте, апробированная методология создает основу для создания «цифровых двойников» хвостохранилищ, интегрирующих данные о загрязнении растительности, почв и вод. Заключительным выводом работы является доказательство того, что использование весовых коэффициентов по классам опасности принципиально меняет картину приоритетных загрязнителей по сравнению с классическим $ИЗБ$: игнорирование дифференцированной токсикологии приводит к недооценке экологического риска от Pb и Cd и переоценке вклада Mn. Таким образом, предложенный модифицированный индекс $ИЗБ_{взв}$ является более адекватным инструментом для гигиенической оценки состояния рекультивированных территорий в зоне влияния предприятий горной отрасли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколов А. А., Шепелев И. И., Адам А. М. Научное обоснование, разработка и апробация инженерных решений по рекультивации горных территорий // Устойчивое развитие горных территорий. — 2026. — Т. 18. — № 1. — С. 18–27. DOI: 10.21177/1998-4502-2026-18-1-18-27.
2. Соколов А. А., Пучкова Т. В., Фоменко В. А., Плахотин Д. А., Шепелев И. И. Результаты исследований распределения токсичных веществ в растениях и на поверхности рекультивированного хвостохранилища // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2026. — № 1. — С. 111–126. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_1_0_111.

3. 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.
4. Adnan M., Xiao B., Ali M. U., Han Q. Heavy metal pollution in soils affected by copper mining and geospatial analysis in the Ophiolite belt of Pakistan // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2026, vol. 14, no. 2, article 121651. DOI: 10.1016/j.jece.2026.121651.
5. Озарян Ю. А., Кожевникова Т. В. К вопросу исследования постэксплуатационного развития природно-технических систем в зоне воздействия горных предприятий Хабаровского края // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 12. – С. 50–61. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_12_0_50.
6. Zhou Y., Cheng Y. Spatial distribution and source-specific ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of Dongting Lake, China // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2025, vol. 35, no. 7, pp. 2354–2371. DOI: 10.1016/S1003-6326(25)66820-8.
7. Данилов А. С., Кремчев Э. А., Лозовая А. С., Гайдак В. О. Мониторинг загрязнения почв Мончегорска: причины и последствия // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 9. – С. 53–66. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_9_0_53.
8. Куликова Е. Ю., Баловцев С. В., Скопинцева О. В. Геоэкологический мониторинг при ведении горных работ // Устойчивое развитие горных территорий. – 2024. – Т. 16. – № 2. – С. 580–588. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-2-580-588.
9. Hossain M. K., Riya K. K., Jubaer A. A., Arai T., Ngah N., Yu J., Hossain M. B. Multi-index and multivariate assessment of heavy metal contamination and ecological risks in the largest deltaic Estuary of South Asia // Marine Pollution Bulletin. 2026, vol. 225, article 119202. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2025.119202.
10. Saha A., Gupta B. S., Patidar S., Martínez-Villegas N. Contamination risk assessment and distribution of rare trace metal(loid)s in surface soil of Cerrito Blanco, Mexico using various contamination indices // Total Environment Advances. 2024, vol. 9, article 200086. DOI: 10.1016/j.teadva.2023.200086.
11. Miao Y., Li H., Xue L., Shen C., Wang F. Application of a semi-variogram-based KNN algorithm in the spatial prediction of soil heavy metals // Environmental Pollution. 2026, vol. 390, article 127436. DOI: 10.1016/j.envpol.2025.127436.
12. 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.
13. Hridoy M. A. A. M., Akter P., Bordin C., Acharjee M. R., Baki A. O., Neogi S., Masood A., David G. S. Integrated assessment of heavy metal contamination and human health risks in granitic soils of South India: A multi-index approach to pollution and ecological impacts // Results in Surfaces and Interfaces. 2025, vol. 20, article 100628. DOI: 10.1016/j.rsufi.2025.100628.
14. 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.
15. Yang H., Wang F., Yu J., Huang K., Zhang H., Fu Z. An improved weighted index for the assessment of heavy metal pollution in soils in Zhejiang, China // Environmental Research. 2021, vol. 192, article 110246. DOI: 10.1016/j.envres.2020.110246.
16. Włodarczyk T., Babst F., Murawska-Włodarczyk K., Stokes O., Salywon A., Leeuwen W. J. D., Norton C. L., Rader S., Maier R. M., Babst-Kostecka A. Dryland ecosystem regeneration and plant metal(loid) accumulation strategies 60 years after revegetating a mine tailings pond // Science of The Total Environment. 2025, vol. 1004, article 180705. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.180705.
17. Liu L. R., Yan J., Xiang L., Liu T., Xiao Y., Liu W. S., Wu W. J., Li P., Zhang M., Chao Y. Q., Tang Y. T., Qiu R. L. Metallurgical organic pollutants assisted source apportionment of mobile heavy metals on artisanal non-ferrous metal processing contamination // Journal of Hazardous Materials. 2025, vol. 500, article 140371. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2025.140371.
18. Mputu J. N. K., Nkutu L. K., Kisimba T. N., Masudi M. K., Papier S., Tshamala A. K., Baele J. M. Physicochemical qualities and ecological risk assessment of soil and plants heavy metals contamination in a selected areas around Kipushi mining at the Congolese Copperbelt in DR Congo // Scientific African. 2025, vol. 30, article e02987. DOI: 10.1016/j.sciaf.2025.e02987.

19. De Simone F., D'Amore F., Bencardino M., Carbone F., Hedgecock I. M., Sprovieri F., Cinnirella S., Pirrone N. The GOS4M Knowledge Hub: A web-based effectiveness evaluation platform in support of the Minamata Convention on Mercury // *Environmental Science & Policy*. 2021, vol. 124, pp. 235 – 246. DOI: 10.1016/j.envsci.2021.06.021.

20. Aparisi-Navarro S., Moncho-Santonja M., Defez B., Candeias C., Rocha F., Peris-Fajarnés G. Exploring environmental risk in soils: Leveraging open data for non-sampling assessment? // *Heliyon*. 2025, vol. 11, no. 1, article e41247. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e41247. **WAS**

REFERENCES

1. Sokolov A. A., Shepelev I. I., Adam A. M. Scientific basis, development and testing of engineering solutions for the reclamation of mountain territories. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2026, vol. 18, no. 1, pp. 18 – 27. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2026-18-1-18-27.

2. Sokolov A. A., Puchkova T. V., Fomenko V. A., Plakhotin D. A., Shepelev I. I. Research findings on spreading of toxic substances in plants on the surface of reclaimed tailings ponds. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026, no. 1, pp. 111 – 126. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_1_0_111.

3. 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.

4. Adnan M., Xiao B., Ali M. U., Han Q. Heavy metal pollution in soils affected by copper mining and geospatial analysis in the Ophiolite belt of Pakistan. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2026, vol. 14, no. 2, article 121651. DOI: 10.1016/j.jece.2026.121651.

5. Ozaryan Yu. A., Kozhevnikova T. V. Studying post-mining development of natural-technical systems in influence zones of mines in the Khabarovsk Krai. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024, no. 12, pp. 50 – 61. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_12_0_50.

6. Zhou Y., Cheng Y. Spatial distribution and source-specific ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of Dongting Lake, China. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2025, vol. 35, no. 7, pp. 2354 – 2371. DOI: 10.1016/S1003-6326(25)66820-8.

7. Danilov A. S., Kremcheev E. A., Lozovaya A. S., Gaydak V. O. Monitoring soil pollution in the town of Monchegorsk: Causes and consequences. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025, no. 9, pp. 53 – 66. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_9_0_53.

8. Kulikova E. Yu., Balovtsev S. V., Skopintseva O. V. Geoecological monitoring during mining operations. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024, vol. 16, no. 2, pp. 580 – 588. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-2-580-588.

9. Hossain M. K., Riya K. K., Jubaer A. A., Arai T., Ngah N., Yu J., Hossain M. B. Multi-index and multivariate assessment of heavy metal contamination and ecological risks in the largest deltaic Estuary of South Asia. *Marine Pollution Bulletin*. 2026, vol. 225, article 119202. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2025.119202.

10. Saha A., Gupta B. S., Patidar S., Martinez-Villegas N. Contamination risk assessment and distribution of rare trace metal(loid)s in surface soil of Cerrito Blanco, Mexico using various contamination indices. *Total Environment Advances*. 2024, vol. 9, article 200086. DOI: 10.1016/j.teadva.2023.200086.

11. Miao Y., Li H., Xue L., Shen C., Wang F. Application of a semi-variogram-based KNN algorithm in the spatial prediction of soil heavy metals. *Environmental Pollution*. 2026, vol. 390, article 127436. DOI: 10.1016/j.envpol.2025.127436.

12. 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.

13. Hridoy M. A. A. M., Akter P., Bordin C., Acharjee M. R., Baki A. O., Neogi S., Masood A., David G. S. Integrated assessment of heavy metal contamination and human health risks in granitic soils of South India: A multi-index approach to pollution and ecological impacts. *Results in Surfaces and Interfaces*. 2025, vol. 20, article 100628. DOI: 10.1016/j.rsufi.2025.100628.

14. 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.

15. Yang H., Wang F., Yu J., Huang K., Zhang H., Fu Z. An improved weighted index for the assessment of heavy metal pollution in soils in Zhejiang, China. *Environmental Research*. 2021, vol. 192, article 110246. DOI: 10.1016/j.envres.2020.110246.

16. Włodarczyk T., Babst F., Murawska-Włodarczyk K., Stokes O., Salywon A., Leeuwen W. J. D., Norton C. L., Rader S., Maier R. M., Babst-Kostecka A. Dryland ecosystem regeneration and plant metal(loid) accumulation strategies 60 years after revegetating a mine tailings pond. *Science of The Total Environment*. 2025, vol. 1004, article 180705. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.180705.

17. Liu L. R., Yan J., Xiang L., Liu T., Xiao Y., Liu W. S., Wu W. J., Li P., Zhang M., Chao Y. Q., Tang Y. T., Qiu R. L. Metallurgical organic pollutants assisted source apportionment of mobile heavy metals on artisanal non-ferrous metal processing contamination. *Journal of Hazardous Materials*. 2025, vol. 500, article 140371. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2025.140371.

18. Mputu J. N. K., Nkutu L. K., Kisimba T. N., Masudi M. K., Papier S., Tshamala A. K., Baele J. M. Physicochemical qualities and ecological risk assessment of soil and plants heavy metals contamination in a selected areas around Kipushi mining at the Congolese Copperbelt in DR Congo. *Scientific African*. 2025, vol. 30, article e02987. DOI: 10.1016/j.sciaf.2025.e02987.

19. De Simone F., D'Amore F., Bencardino M., Carbone F., Hedgecock I. M., Sprovieri F., Cinnirella S., Pirrone N. The GOS4M Knowledge Hub: A web-based effectiveness evaluation platform in support of the Minamata Convention on Mercury. *Environmental Science & Policy*. 2021, vol. 124, pp. 235 – 246. DOI: 10.1016/j.envsci.2021.06.021.

20. Aparisi-Navarro S., Moncho-Santonja M., Defez B., Candeias C., Rocha F., Peris-Fajarnés G. Exploring environmental risk in soils: Leveraging open data for non-sampling assessment? *Heliyon*. 2025, vol. 11, no. 1, article e41247. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e41247.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пучкова Татьяна Васильевна¹ — канд. техн. наук, доцент,
e-mail: tpuchkova@sfedu.ru, ORCID ID: 0009-0003-0200-1250,

Рогозов Юрий Иванович — канд. техн. наук, профессор,
зав. кафедрой, ИКТИБ Южного федерального университета г. Таганрог,
e-mail: yrogozov@sfedu.ru, ORCID ID: 0000-0002-9125-7826,

Плахотин Дмитрий Андреевич¹ — ассистент,
e-mail: plakhotin@sfedu.ru, ORCID ID: 0009-0005-5329-6903,

Лукьянов Александр Сергеевич — студент, Открытый университет
экономики, управления и права, e-mail: alexandr.luckjanov@yandex.ru,
ORCID ID: 0009-0005-5123-7344,

Соколов Андрей Андреевич¹ — канд. техн. наук, доцент,
зав. кафедрой, e-mail: anso@sfedu.ru, ORCID ID: 0000-0002-1127-9612,

¹ Филиал Южного федерального университета в г. Геленджике.

Для контактов: Соколов А.А., e-mail: anso@sfedu.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

T.V. Puchkova¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
e-mail: tpuchkova@sfedu.ru, ORCID ID: 0009-0003-0200-1250,

Y.I. Rogozov, Cand. Sci. (Eng.), Professor, Head of Chair,
ICTIS Branch of Southern Federal University Taganrog, Taganrog, Russia,
e-mail: yrogozov@sfedu.ru, ORCID ID: 0000-0002-9125-7826,

D.A. Plakhotin¹, Assistant, e-mail: plakhotin@sfedu.ru, ORCID ID: 0009-0005-5329-6903,
A.S. Lukyanov, Student, Open University of Economics, Management
and Law, Moscow, Russia, e-mail: alexandr.luckjanov@yandex.ru,
ORCID ID: 0009-0005-5123-7344,

A.A. Sokolov¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Head of Chair,
e-mail: anso@sfedu.ru, ORCID ID: 0000-0002-1127-9612,

¹ Branch of Southern Federal University in Gelendzhik, Gelendzhik, Russia.

Corresponding author: A.A. Sokolov, e-mail: anso@sfedu.ru.

Получена редакцией 04.04.2026; получена после рецензии 07.05.2026; принята к печати 10.07.2026.

Received by the editors 04.04.2026; received after the review 07.05.2026; accepted for printing 10.07.2026.