ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2025;(12-1):143-156
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 504.03:631.618 DOI: 10.25018/0236_1493_2025_121_0_143

# МОДЕЛИ РЕКУЛЬТИВАЦИИ ПОРОДНЫХ ОТВАЛОВ МЕДНЫХ РУДНИКОВ СВЕРДЛОВСКОЙ ОБЛАСТИ

**Л.А. Стороженко[1], В.Б. Болтыров[1], М.С. Лебзин[1], С.А. Дегтярев[1]**

[1] Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия, e-mail: boltyrov34@mail.ru

***Аннотация:*** Рассмотрены три концептуальные модели рекультивации породных отвалов медных рудников Свердловской области. На Среднем Урале остановленные медные рудники – Дегтярский, Левихинский, Белореченский, Карпушихинский, Ломовский, Зюзельский и другие – представляют типичные объекты накопленного вреда окружающей среде. В зависимости от возраста формирования и естественной химической рекультивации в результате химического и органического выветривания и разрушения сульфидов породные отвалы остановленных медных рудников условно разделены на три группы. К первой группе отнесены наиболее старые и, соответственно, наиболее разрушенные, или «пустые», породные отвалы, которые широко используются в качестве закладочного материала при отсыпке дамб, строительстве дорог, засыпке зон обрушения и других неровностей рельефа. Ко второй группе отнесены слабо минерализованные породные отвалы, экологическая опасность которых незначительна, и, наконец, к третьей группе отнесены сильно минерализованные породные отвалы, в которых сульфидная минерализация еще не прошла в полной мере естественное разрушение под действием природных факторов. Соответственно, рассмотрены три концептуальные модели рекультивации породных отвалов медных рудников: одноэтапная, двухэтапная и трехэтапная. При одноэтапной рекультивации на техническом этапе породные отвалы используются в качестве закладочного материала, что широко практикуется на остановленных медных рудниках Среднего Урала.

***Ключевые слова:*** модели, рекультивация, медные рудники, породные отвалы, одноэтапная модель рекультивации, двухэтапная модель рекультивации, трехэтапная модель рекультивации, объекты накопленного вреда окружающей среде.

***Благодарность:*** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-17-20033, https://rscf.ru/en/project/24-17-20033/ при финансовой поддержке Правительства Свердловской области (№ 8-25-ОГ, от 27.03.2025 г.).

***Для цитирования:*** *Стороженко Л. А., Болтыров В. Б., Лебзин М. С., Дегтярев С. А.* Модели рекультивации породных отвалов медных рудников Свердловской области // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 12-1. – С. 143–156. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_121_0_143.

## Models of rock dump reclamation in copper mines of the Sverdlovsk region

**L.A. Storozhenko[1], V.B. Boltyrov[1], M.S. Lebzin[1], S.A. Degtyarev[1]**

[1] Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia, e-mail: boltyrov34@mail.ru

***Abstract:*** This article examines three conceptual models for the reclamation of waste dumps from copper mines in the Sverdlovsk region. In the Middle Urals, abandoned copper mines — Degtyarsky, Levikhinsky, Belorechensky, Karpushikhinsky, Lomovsky, Zyuzelsky, and others — represent typical sites of accumulated environmental damage. Based on their age of formation and natural chemical reclamation through chemical and organic weathering and sulfide destruction, the waste dumps from abandoned copper mines are conventionally divided into three groups. The first group includes the oldest and, consequently, most degraded, or "empty" waste dumps, which are widely used by local authorities and copper mine residents as backfill material for dams, road construction, and for filling collapse zones and other uneven terrain. The second group includes weakly mineralized waste dumps, which pose a minor environmental hazard. Finally, the third group includes highly mineralized waste dumps, where sulfide mineralization has not yet fully degraded under the influence of natural factors. Accordingly, three conceptual models for reclamation of copper mine waste dumps are considered: single-stage, two-stage, and three-stage. In single-stage reclamation, waste dumps are used as backfill material during the technical stage, a practice widely practiced at abandoned copper mines in the Middle Urals.

***Key words:*** models, reclamation, copper mines, waste dumps, single-stage reclamation model, two-stage reclamation model, three-stage reclamation model, objects of accumulated environmental damage.

***Acknowledgements:*** The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 24-17-20033, https://rscf.ru/en/project/24-17-20033 / with the financial support of the Government of the Sverdlovsk region (No. 8-25-OG, dated 03/27/2025).

***For citation:*** Storozhenko L. A., Boltyrov V. B., Lebzin M. S., Degtyarev S. A. Models of rock dump reclamation in copper mines of the Sverdlovsk region. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(12-1):143-156. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_121_0_143.

## Введение

Сульфидсодержащие породные отвалы медных рудников Свердловской области являются источниками химического загрязнения окружающей среды [1 — 3]. Атмосферные осадки, просачиваясь через отвальные тела, формируют кислые подотвальные воды, с которыми на прилегающие участки выносятся поллютанты, превращающие последние в техногенные пустоши. При этом экологическая опасность породных отвалов сохраняется на долгие годы [4 — 7], как это видно на примере остановленных медных рудников Свердловской области (Дегтярский, Левихинский, Белореченский, Карпушихинский, Ломовский, Зюзельский и другие).

Дегтярское медно-колчеданное месторождение было открыто в 1890 г., однако промышленное освоение месторождения началось лишь в 1914 г., разведочные работы были проведены только в 1925 г., а отработка завершилась в 1995 г. в связи с истощением запасов.

Левихинское медно-колчеданное месторождение обнаружено в 2014 г., разведочные работы были проведены только в 1925 г., а отработка месторождения началась в 1927 г. вначале открытым, а позднее — подземным способом. В 2003 г. работа Левихинского рудника была приостановлена по экономическим соображениям, хотя в недрах остались значительные непогашенные запасы медных и цинковых руд.

На обоих рудниках, так же как на Карпушихинском, Белореченском, Ломовском и Зюзельском, породные отвалы широко используются в качестве закладочного материала для выравнивания неровностей рельефа, в частности засыпки зон обрушения, отсыпки дорог и дамб. В настоящее время на Дегтярском руднике не задействованные отвальные породы сосредоточены на двух терриконах возле шахт «Капитальная–1» и «Капитальная–2». На Левихинском руднике выявлено 11 самостоятельных породных отвалов, рассредоточенных на территории в 30 га. Тарньерское месторождение медно-цинковых руд было открыто в 2006 г. при сдаче в эксплуатацию Северного медно-цинкового рудника (СМЦР), где Тарньерское месторождение стало первым на Северном Урале разрабатываемым меднорудным объектом. Добыча медно-цинковой руды открытым способом было завершено в 2014 г. ОАО «Святогор». Шемурское медно-колчеданное месторождение было открыто в 1975 г., но отработано СМЦР ОАО «Святогор» лишь в 2016 г. Строительство рудника началось в 2008 г., в эксплуатацию карьер был введен в 2010 г. Ново-Шемурское месторождение было открыто в 1976 г., отрабатывается ОАО «Святогор» с 2011 г. открытым способом [1].

Следует отметить, что, по сравнению с остановленными среднеуральскими рудниками, строительство СМЦР осуществлялось не только с учетом работы в условиях северного Урала, но и с использованием современных технологий отработки рудных месторождений и новейшего оборудования. Так, на территории Тарньера были построены дробильно-сортировочный комплекс, корпус рентгенорадиометрической сепарации, предназначенный для снижения потерь полезных ископаемых при добыче руды, а также современные очистные сооружения для очистки карьерных и подотвальных вод. И тем не менее, значительная часть химического токсичного загрязнения стала поступать в поверхностные водотоки — реки Тамшер, Ольховка, Шегультан, Черная, Банная, которые, по признанию местных экологов, оказались за несколько лет непригодными для био- и фитоценоза [8, 9]. В долинах рек появились очаги гибели леса, особенно разросшиеся после 2017 г., а начавшиеся, как показали космические снимки, после 2009 г.

Отбор проб воды из рек Тамшер, Ольховка показал низкий уровень кислотности (pH 4,5 — 4,8); сменился гидрохимический профиль речной воды от гидрокарбонатной до ярко выраженной сульфатной. Содержание сульфатов превышало допустимую концентрацию для водных объектов рыбохозяйственного значения в 7 раз (р. Ольховка) и в 28 раз (р. Тамшер). В воде указанных рек отмечались повышенные содержания железа и других токсичных элементов, превышающие допустимые уровни в 1,2 раза (р. Ольховка) и в 4,5 раза (р. Тамшер).

Экоактивисты некоммерческой организации «Живой Шемур», проанализировав пробы воды из поверхностных водотоков, впадающих в реки Ивдель и Сосьва, заявили: наибольшее количество токсичных примесей содержится в р. Тамшер. В его водах содержание меди в 60 тыс. раз превышает нормы, цинка — в 6 тыс., марганца — в 3 тыс. раз. Немного уступает Тамшеру вода, стекающая по канаве в его русло, там меди в 50 тыс. раз больше нормы. Аналогичная ситуация зафиксирована в ручьях, вытекающих из-под отвалов Шемурского карьера [2, 9, 10].

Летом 2017 г. вода в р. Ивдель, куда втекают загрязненные малые реки (а эта река является источником водоснабжения г. Ивдель), приобрела зеленый цвет и кислый вкус. Использовать такую во-

ду для хозяйственно-бытовых нужд не рекомендуется. Это спровоцировало общественные слушания из-за начавшейся региональной экологической катастрофы. К процессу подключились сотрудники природного заповедника «Денежкин камень», заявившие, что с 2009 г. наблюдается вымирание леса, а в реках гибнет рыба. За последние 10 лет погибло более 435 га леса.

Так как кислые воды, разрушающие экосистемы, попадают на рельеф из-под отвалов, производителем добычных работ ОАО «Святогор» было принято единственно правильное в данном случае и кардинальное решение по изоляции поверхности отвалов от атмосферных осадков — укрыть 780 тыс. м$^2$ отвалов геомембранами на основе бентонитовых матов. Весь объем работ планируется выполнить за пять лет и израсходовать на природоохранные мероприятия более 1 млрд руб. [11—13].

**Материалы исследования**

Несмотря на довольно длительное нахождение на поверхности, исчисляемое многими десятилетиями, и постоянное физическое и химическое разрушение, в отдельных случаях породные отвалы в силу наличия в них не разрушившихся сульфидов сохраняют экологическую опасность. В табл. 1 и 2 приведены химические составы отвальных пород терриконов шахты «Капитальная–1» и «Капитальная–2» Дегтярского рудника.

Химический анализ произведен в Научно-исследовательской и испытательной лаборатории аналитической химии ФГБОУ ВО «УГГУ».

Опробование терриконов производилось методом конвертов и бороздовым методом в средней части и у основания терриконов.

Анализ данных табл. 1 и 2 показывает, что содержание практически всех тяжелых металлов (кадмий, кобальт, хром, медь, железо, молибден, никель, свинец и цинк) в вертикальном разрезе отвального тела к основанию терриконов повышается, что свидетельствует о миграции выщелоченных химических элементов к основанию породных отвалов и их вы-

Таблица 1

***Химический состав отвальных пород терриконов шахты Капитальная–1, мг/кг***
***Chemical composition of waste rocks of the Kapitalnaya mine–1, mg/kg***

| **Номер пробы** / **Элементы** | **ДК 1–Ю$_н$** | **ДК 1–Ю$_с$** | **ДК 1–З$_н$** | **ДК 1–З$_с$** | **ДК 1–С$_н$** | **ДК 1–В$_н$** | **ДК 1–В$_с$** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Барий | 2065 | 4421 | 337 | 2703 | 2395 | 3304 | 2774 |
| Кадмий | 12 | 13 | 65 | 14 | 5 | 22 | 51 |
| Кобальт | 18 | 50 | 19 | 27 | 6 | 40 | 21 |
| Хром общий | 13 | 90 | 16 | 34 | 6 | 328 | 15 |
| Медь | 506 | 259 | 212 | 168 | 141 | 489 | 351 |
| Железо | 68 338 | 69 945 | 65 740 | 69 625 | 37 367 | 104 956 | 52 226 |
| Марганец | 192 | 249 | 233 | 144 | 184 | 1808 | 166 |
| Молибден | 231 | 329 | 46 | 245 | 230 | 220 | 44 |
| Никель | 22 | 24 | 20 | 26 | 8 | 48 | 17 |
| Свинец | 523 | 893 | 656 | 935 | 359 | 500 | 737 |
| Цинк | 130 | 28 | 144 | 118 | 106 | 449 | 288 |

Таблица 2

***Химический состав отвальных пород террикона шахты Капитальная–2, мг/кг***
***Chemical composition of waste rocks of the Kapitalnaya mine–2, mg/kg***

| **Номер пробы** / **Элементы** | **ДК 2–1** | **ДК 2–2** | **ДК 2–3** | **ДК $2_с$ – [1—6]** | **ДК $2_н$ – [1—8]** |
|---|---|---|---|---|---|
| Барий | 249,27 | 244,37 | 188,93 | 173,09 | 214,39 |
| Кадмий | 2,25 | 3,74 | 6,28 | 5,16 | 5,6 |
| Кобальт | 4,64 | 6,03 | 9,67 | 9,69 | 11,01 |
| Хром общий | 9,14 | 13,55 | 37,69 | 26,77 | 29,63 |
| Медь | 38,17 | 42,21 | 104,69 | 64,13 | 56,36 |
| Железо | 24 095,8 | 27 722,77 | 43 868,39 | 38 026,91 | 30 769,23 |
| Марганец | 130,5 | 143,56 | 60,82 | 104,04 | 154,61 |
| Молибден | 23,61 | 25,29 | 38,24 | 29,42 | 30,96 |
| Никель | 11,24 | 17,6 | 17,95 | 20,09 | 24,14 |
| Свинец | 257,09 | 257,43 | 389,33 | 211,66 | 243,34 |
| Цинк | 47,85 | 126,91 | 200,4 | 23,18 | 14395 |

носе с подотвальными водами. Так как терриконы являются насыпными телами, то совершенно очевидно, что распределение токсикантов в пространстве крайне неоднородно и неравномерно в объеме конкретного тела террикона, а содержание токсикантов в терриконе шахты «Капитальная–2» на порядок ниже, чем в отвалах пород шахты «Капитальная–1».

На территории Лёвихинского рудника расположено 11 отвалов, сформированных в период с 1927 г. по 2003 г. и объединенных в четыре группы: Северная, Центральная, Восточная и Южная. В табл. 3 приведен химический состав отвальных пород Лёвихинского рудника.

В работе авторов [14] приведено обоснование системы инвентаризации объектов накопленного вреда окружающей среде на примере Левихинского рудника. В данном исследовании показано, что на всех отвалах, независимо от возраста их формирования, отмечаются существенные содержания токсичных тяжелых металлов. Это свидетельствует, что отвальные тела еще не прошли естественную химическую рекультива-

Таблица 3

***Химический состав отвальных пород Лёвихинского рудника, мг/кг***
***Chemical composition of waste rocks of the Levikhinsky mine, mg/kg***

| **Элементы** | **Северная группа** | **Центральная группа** | **Восточная группа** | **Южная группа** | **Фоновые содержания** |
|---|---|---|---|---|---|
| Медь | 617,75 | 890,7 | 500,0 | 230,3 | 116,5 |
| Никель | < 10 | < 10 | < 10 | < 10 | — |
| Цинк | 703,5 | 845,7 | 546,2 | 123,0 | 500,0 |
| Марганец | 429,5 | 129,4 | 567,2 | 239,0 | 1351,0 |
| Кобальт | < 8 | < 8 | < 8 | < 8 | < 8 |
| Железо | 30 187,25 | 61 897,1 | 46 947,0 | 48 504,0 | 28 875,0 |


*Диаграмма IDEFO обращения с породными отвалами*
*IDEFO diagram of waste dump handling*

цию и их состояние нуждается в мониторинге и оценке.

Однако в целом тренд снижения со временем экологической опасности породных отвалов сохраняется на всех изученных объектах, что позволяет использовать наиболее разрушенные и выщелоченные отвалы в качестве закладочного материала. По мере нахождения на поверхности прогрессивно разрушаются и отвалы забалансовых и некондиционных руд, что резко снижает их товарную стоимость как потенциальных минеральных ресурсов. Именно это обстоятельство заставляет современные медные рудники Северного Урала (Тарньер, Шемур и Северный Шемур) консервировать забалансовые руды до будущих времен путем их сохранения в отработанных карьерных нишах, предварительно гидроизолируя основание и борта карьеров путем бетонирования.

Что касается породных отвалов отработанных медно-цинковых месторождений Свердловской области, прошедших в различной степени естественную химическую рекультивацию в результате разрушения атмосферными осадками и талыми водами, их необходимо ликвидировать как объекты накопленного вреда окружающей среде (ОНВОС) [15].

Общую схему обращения с породными отвалами можно изобразить в виде диаграммы IDEFO, главным компонентом которой является прямоугольный Блок, имеющий Вход и Выход (рисунок). Последние отображают составляющие функции ликвидации ОНВОС. На Входе отмечаются экологическая проблема негативного воздействия отвалов на окружающую среду и другая имеющаяся информация об объекте ликвидации, т.е. исходные материалы (породные отвалы), используемые блоком для получения результата на Выходе.

Сверху Блока указываются составляющие Управления, куда входят условия, правила, стратегия, стандарты, которые влияют на выполнение управляющей функции Блока. В рассматриваемом случае Управление будет состоять из Федерального закона от 10.01.2002 № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды», Федерального закона от 03.07.2016 № 254 «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации», в которых изложены правовые основы в области выявления, оценки и учета ОНВОС, определены Правила организации работ по ликвидации ОНВОС. Хотя, в соответствии с пунктом 1 статьи 80.2 ФЗ № 7 «Об охране окружающей среды», ликвидация ОНВОС осу-

ществляется только на объектах, включенных в ГРОНВОС.

В статье рассматриваются модели ликвидации (рекультивации) породных отвалов на всех остановленных медных рудниках Свердловской области, включение которых в ГРОНВОС является делом времени.

В Управление ликвидацией ОНВОС включается обязательно зарубежный и отечественный опыт, а также методология (методы, методики) и проект ликвидации ОНВОС.

Снизу Блока ликвидации ОНВОС располагаются Механизмы, под которыми понимаются исполнители, финансы, оборудование и лабораторная база, используемые при ликвидации ОНВОС.

На Выходе в результате ликвидации (рекультивации) ОНВОС должна появиться технически спланированная и экологически сбалансированная территория, которую можно будет использовать в народнохозяйственных или рекреационных целях.

**Одноэтапная модель рекультивации**

Породные отвалы, сформированные около горных выработок, пройденных в первой половине прошлого века, в результате естественной химической рекультивации со временем превращаются в превосходный закладочный материал, совершенно неопасный для окружающей среды. Особенно наглядно это видно на Дегтярском руднике, где отвальные породы широко используются для планировочных работ в виде отсыпки дорог, дамб и неровностей рельефа. Так как Дегтярское рудное поле совмещено с селитебной зоной, испещренной густой сетью автомобильных дорог и железнодорожных путей, то для формирования их фундаментов, естественно, использовались в виде закладочного материала местные отвальные породы.

Когда карьер около шахты Колчеданная, находящийся на наиболее низком гипсометрическом уровне зеркала подземных вод Дегтярского рудного поля, будет принудительно осушен, его после гидроизоляционной подготовки можно будет засыпать. Для этой цели наиболее подходящим материалом будут отвальные породы верхней половины терриконов шахт Капитальная–1 и Капитальная–2, прошедшие в полном объеме естественную химическую рекультивацию.

После снятия верхней половины терриконов их высота понизится до 20 м над поверхностью земли, что позволит выположенные отвальные тела рекультивировать двухэтапным способом.

**Результаты**

*Поливариантная двухэтапная рекультивация породных отвалов*

Двухэтапная рекультивация может быть проведена в разных вариантах, различающихся между собой способами покрытия выравненной на техническом этапе поверхности породного отвала.

*А. Вариант рекультивации по методу ООО «Эворок» (г. Екатеринбург)*

В Свердловской области ОАО «Святогор» (Уральская горно-металлургическая компания) в настоящее время ведет разработку трех медно-цинковых месторождений (Тарньер, Шемур и Северный Шемур). Месторождения расположены на Северном Урале в горной местности недалеко от заповедника «Денежкин Камень» и в 40 км от г. Ивдель. Горнодобычные работы ведутся открытым способом, в будущем предполагается продолжение добычных работ и подземным шахтным способом. В настоящее время открытые горные работы ведутся только на Северном Шумере, Тарньерское и Шемурское месторождения отработаны карьерами.

Для предотвращения загрязнения поверхностных стоков речек, впадающих в реки Ивдель и Сосьва, подотвальными водами по заданию ОАО «Святогор» инжиниринговой компанией «Эворок» (г. Екатеринбург) в 2018 г. разработана программа рекультивации отвалов отработанного Шемурского месторождения площадью более 730 тыс. м$^2$. Программа рекультивации получила положительное заключение Государственной экологической экспертизы и согласована с Департаментом по надзору в сфере природопользования по Уральскому Федеральному округу [11, 12].

На техническом этапе рекультивации происходит выполаживание поверхности отвалов. Склоны делаются более пологими, чтобы обеспечить безопасность дальнейших работ. Затем производят укрытие отвалов бентонитовыми матами, которые исключают проникновение атмосферных осадков в тело отвалов. После гидроизоляции поверхности отвалов создается плодородный слой, для чего используется древесная или целлюлозная мульча, обогащенная специальным торфом. Для посева растительного слоя применялись специальные распылительные установки, которые не повреждали семена.

Вдоль склонов отвалов прокладываются водосточные канавы, по которым поверхностные воды поступают вместе с рудничными водами на аккумулирующие пруды, где они усредняются, а затем насосами подаются на очистительные сооружения.

*Б. Двухэтапная рекультивация породных отвалов сорбентами-мелиорантами*

В работе [16] показано, что использование торфа и осадков водоподготовки в составе композитного сорбента-мелиоранта обеспечивает эффективную сорбцию ионов тяжелых металлов, и разработана технология консервации (рекультивации) породных отвалов.

На примере самого крупного отвала Левихинского рудника дано эколого-экономическое обоснование рекультивации отвалов данным способом. Рекультивация породного отвала проводится в следующей последовательности.

Технический этап рекультивации: выравнивание поверхности породного отвала — удаление и разрушение крупнообломочного материала — выполаживание откосов бортов отвала, террасирование — внесение сорбентов-мелиорантов.

Биологический этап рекультивации: внесение плодородного слоя почвы, посев семян и древесно-кустарниковой растительности.

Стоимость рекультивации породного отвала Левихинского рудника составляет, по [16], не менее 169 млн руб.при использовании в качестве сорбента-мелиоранта торфа и осадков водоподготовки в пропорции 60/40 масс%. Себестоимость производства самого сорбента-мелиоранта на основе торфа и осадков водоподготовки в среднем составит 2400,00 — 2900,00 руб. за 1 т готовой продукции в зависимости от типа и качества торфа, процентного соотношения в сорбенте-мелиоранте продукции компонентов (торф — осадки водоподготовки), инфляции и других экономических факторов.

Как отмечает директор СМЦР Александр Хватов [13], ОАО «Святогор» затратил на рекультивацию породных отвалов площадью 780 тыс. м$^2$ не менее 1 млрд руб., что составит 12 млн 820 тыс. руб. за 1 га, тогда как рекультивация породных отвалов сорбентами-мелиорантами обойдется в 5 млн 633 тыс. руб. за 1 га.

Таким образом, по экономическим соображениям, для рекультивации породных отвалов остановленных медных

рудников Среднего Урала (Дегтярский, Левихинский, Зюзельский и другие) можно рекомендовать более дешевый и не менее надежный способ рекультивации сорбентами-мелиорантами.

*Трехэтапная рекультивация породных отвалов*

Отходы добычи сульфидных руд, отсыпанные на поверхности, имеют различные размеры, форму и объемы и изначально представляют собой потенциальные источники различных металлов, прежде всего цветных. Однако в большинстве своем многочисленные тела остаются нетронутыми, оказывая лишь негативное воздействие на окружающую среду и здоровье населения [17].

Основной причиной снижения со временем инвестиционной привлекательности сульфидсодержащих отвалов являются их длительное нахождение на поверхности, прогрессирующее разрушение рудной составляющей, инфляция ресурсов, отсутствие простых, экономически выгодных и надежных технологий извлечения металлов из сульфидсодержащих отвалов.

Совершенно очевидно, что освоение отходов добычи сульфидсодержащих руд значительно легче производить на базе действующих медных рудников, обеспеченных квалифицированными кадрами, производственными мощностями и готовой инфраструктурой. В абсолютно иных условиях находятся «брошенные, бесхозные» отвалы, организация разработки которых требует строительства перерабатывающего производства, причем чаще всего на пустом месте. В рассматриваемом случае потенциальный интерес представляет лишь один из 11 породных отвалов Левихинского рудника, а также отвалы забалансовых руд. В 1995 г., еще до закрытия в 2003 г. рудника А.В. Коминым [3] была предпринята попытка оценить возможность применения кучного выщелачивания на данном породном отвале, а также на отвале забалансовых руд.

Отвал забалансовых руд содержит примерно 393 840 т, среднее содержание меди в отвале составляет 0,46%, цинка — 0,39%, серы — 7,1%. Общие запасы металла: меди — 1812 т, цинка — 1536 т [18].

Отвал минерализованных пород массой 2 820 000 т, среднее содержание меди — 0,16%, цинка — 0,055%, серы — 22,56%. Запасы металла составляют: меди — 4512 т, цинка — 1551 т [18].

Исследования проводились перколяционным методом в лабораторных условиях. В результате проведенных исследований было установлено, что процесс выщелачивания осуществляется в три этапа. На первом этапе процесс кучного выщелачивания идет достаточно интенсивно. В этот момент происходит растворение в основном сульфатов и окислов металлов. На втором этапе растворяются оксиды и вторичные сульфиды меди, а также оксиды и сульфиды цинка, находящиеся в нарушенных зернах сфалерита. На третьем этапе скорость процесса растворения металлов резко снижается. В этот период основная масса оксидов и вторичных сульфидов выщелочена, а растворение первичных сульфидов, находящихся в хорошо раскристаллизованных минералах, идет крайне медленно.

Выщелачивание забалансовых руд и минерализованных пород было проверено с помощью трех реагентов — раствором серной кислоты в концентрации 1 — 3 г/дм$^3$, кислыми шахтными и подотвальными водами. Исследование показало, что выщелачивание минерализованной породы и бедной руды достаточно богатыми по содержанию меди и цинка шахтными и подотвальными водами практически не идет. Наоборот, наблюдается снижение концентрации ме-

таллов в продуктивных растворах по сравнению с шахтными и подотвальными водами, происходящее из-за сорбции меди, цинка и железа на породе. Поэтому наиболее оптимальным для кучного выщелачивания отвалов забалансовых руд и минерализованных пород представляется сернокислотное выщелачивание.

В результате лабораторных исследований было показано, что для рентабельного и относительно быстрого извлечения меди и цинка из отвалов необходимо, чтобы отвальные тела прошли естественную химическую рекультивацию в течение не менее 30 — 40 лет, т.е. были «подготовлены» для эффективного кучного выщелачивания.

Таким образом, чтобы использовать отвалы добычи медных руд для извлечения цветных металлов методом кучного выщелачивания, необходимо соблюсти следующие условия: отвалы должны быть или сильно минерализованными сульфидами, или представлены забалансовыми рудами; рентабельное и относительно быстрое извлечение цветных металлов достигается при предварительной естественной химической рекультивации отвалов в течение 30 — 40 лет, когда они становятся «подготовленными» для кучного выщелачивания. Так как минерализованные отвалы остановленных медных рудников размещаются на неизолированном основании, то необходимо дополнительно пробурить и оборудовать несколько специальных гидрогеологических скважин на глубину до 30 м для наблюдения за изменением химического состава подземных вод.

Перед началом кучного выщелачивания поверхность отвала должна быть спланирована строго горизонтально. По периметру орошаемой части отвала необходимо бульдозером организовать водоограничительные бровки высотой до 1 м и шириной до 3 м.

Орошение отвала осуществляется разбрызгиванием раствора по спланированной части отвала из перфорированных полиэтиленовых труб, уложенных на водоограничительных бровках.

Экономические расчеты показали, что посредством кучного выщелачивания рентабельно извлечение цветных металлов только из отвалов забалансовых руд, и тем не менее, Левихинский рудник закрылся в 2003 г., не прибегнув к данной технологии [19].

Между тем из минерализованных отвалов с подотвальными водами выносится на рельеф не менее 27 т меди в год [20], и за четверть века безвозвратно потеряны не только цветные металлы, но и другие ценные компоненты.

Для предотвращения дальнейших потерь металлов необходимо минерализованные отвалы законсервировать и провести на этих отвалах двухэтапную рекультивацию одним из рассмотренных выше вариантов.

**Заключение**

Мировое производство меди с 2024 г. будет отставать от темпов роста спроса по причине высоких затрат в медной отрасли на фоне снижения содержания меди в руде и роста инфляции затрат в основных регионах добычи (Чили и Перу), изменений налоговых условий в мededобывающих регионах мира, ухудшения политической обстановки. Это к 2033 г. приведет к дефициту первичной меди (из концентрата) на уровне более 6 млн т с учетом действующих предприятий и потенциально вероятных проектов.

Начиная с 2024 г. котировки на медь могут поддерживаться на уровне выше 9000 долл./т, а в перспективе могут подняться выше 11000 — 12000 долл./т. В связи с сокращением предложения меди в концентрате и прогнозируемого роста котировок на медь и цинк вовле-

чение в хозяйственный оборот потенциальных ресурсов остановленных медных рудников в виде минерализованных породных отвалов станет насущной задачей.

Вместе с тем в связи с долговременным нахождением на поверхности и постоянным физико-химическим разрушением минерализованные породные отвалы истощаются, теряя свою инвестиционную привлекательность. В связи с этим предлагается на всех остановленных медных рудниках провести инвентаризацию и оценку породных отвалов, как это сделано на Левихинском руднике, и наиболее перспективные из них подвергать двухэтапной рекультивации.

В будущем, когда высокие цены на цветные металлы позволят рентабельно обрабатывать техногенные образования наиболее доступными технологиями, минерализованные отвалы будут вскрыты и отработаны как техногенные месторождения. В частности, повторная разработка минерализованных отвалов должна сопровождаться подготовкой специальной площадки для кучного выщелачивания с гидроизолированным основанием, предотвращающей загрязнение подземной гидросферы, и отсыпкой новой кучи из минерализованных отвалов с рентгенорадиометрической сепарацией для снижения потерь рудной составляющей. Это приведет к повышению процентного соотношения последней до кондиций забалансовых руд и обеспечит рентабельность кучного выщелачивания.

Каждая из рассмотренных в статье концептуальных моделей рекультивации обладает специфическим набором технических, экономических и экологических характеристик. Выбор оптимальной схемы зависит от совокупности факторов: морфологии и минерального состава породных отвалов, содержания полезных компонентов, доступного бюджета, планируемых сроков реализации, а также от целевых приоритетов — будь то максимизация доходов от попутного извлечения металлов, минимизация экологических рисков или долгосрочная устойчивость восстановленной территории.

Различия в капиталоемкости, сроках окупаемости, экологической эффективности и применимости моделей в разных природно-климатических условиях требует системного подхода к принятию решения.

Для двухэтапной рекультивации рассмотрены два варианта. Метод ООО «Эворок» — оптимален для породных отвалов с высоким содержанием металлов, когда возможно их рентабельное извлечение. Он обеспечивает быструю окупаемость, но требует крупных первоначальных инвестиций.

Сорбент-ориентированный метод рационален для породных отвалов с низким содержанием металлов, где ключевой проблемой является экологическая стабилизация территории при умеренных капитальных затратах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Овчинникова Т. В.*, *Уфлянд Г. С.* Расширение Северного медно-цинкового рудника без ущерба окружающей среде Северного Урала // Горный журнал. — 2011. — № 7. — С. 31—34.

2. *Воронова А. Е.*, *Киселева Д. В.*, *Окунева Т. Г.* Оценка экогеохимического статуса рек, протекающих по территории заповедника «Денежкин камень» / Проблемы теоретической и экспериментальной химии. — Екатеринбург, 2024. — 75 с.

3. *Комин А. В.* Защита водных объектов от загрязения стоком с отвалов медно-цинковых руд (на примере Левихинского рудника). Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 11.00.11. — Екатеринбург, 2000. — 17 с.

4. *Высоцкий С. П.*, *Козырь Д. А.* Экологический мониторинг породных отвалов горнопромышленных агломераций // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2021. — Т. 332. — № 11. — С. 37—46.

5. *Жуковская Е. П.* Методика оперативной оценки экологической опасности отходов при разработке медно-цинковых месторождений Урала и перспективные способы их нейтрализации. Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 25.00.36. — Екатеринбург, 2003. — 25 с.

6. *Dusengemungu L., Mubemba B., Gwanama C.* Evaluation of heavy metal contamination in copper mine tailing soils of Kitwe and Mufulira, Zambia, for reclamation prospects // Scientific Reports. 2022, vol. 12, article 11283. DOI: 10.1038/s41598-022-15458-2.

7. *Leiva González J., Onederra I.* Environmental management strategies in the copper mining industry in chile to address water and energy challenges — Review // Mining. 2022, vol. 2, pp. 197—232. DOI: 10.3390/mining2020012.

8. *Злобин Н. И.* Оценка загрязнения водных объектов заповедника «Денежкин камень» от Шемурского месторождения // XXI век. Техносферная безопасность. — 2021. — Т. 6. — № 4. — С. 395—407.

9. *Квашнина А. Е.*, *Возьмитель Ф. К.*, *Хамедов В. А.* Динамика гибели лесной растительности в районе добычи полезных ископаемых на месторождениях северного медно-цинкового рудника в Свердловской области // Вопросы лесной науки. — 2023. — Т. 6. — № 1. — С. 104—115.

10. *Тучина М. В.*, *Ермакова Ю. В.* Обеспеченность запасами медьдобывающих предприятий южного и среднего Урала, состояние и перспективы развития их сырьевой базы // Руды и металлы. — 2019. — № 3. — С. 12—21.

11. *Овчинникова Т., Солодовников Д.* В борьбе с кислыми водами // ТехНадзор. — 2017. — № 8 (129). — С. 71.

12. *Антонинова Н. Ю.*, *Корнилков С. В.*, *Кузнецова Я. А.*, *Шубина Л. А.* Экологические аспекты рекультивации отвалов вскрышных пород // Проблемы недропользования. — 2024. — № 1(40). — С. 57—66.

13. *Достовалова Д. А.*, *Подгородецкий Н. С.* Прогнозирование уровня профессионального риска при рекультивации породного отвала // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. — 2023. — № 3 (161). — С. 48—55.

14. *Дегтярев С. А.*, *Болтыров В. Б.*, *Прокопьева А. А.*, *Шайхутдинова М. М.* Обоснование системы инвентаризации объектов накопленного вреда окружающей среде (на примере Левихинского рудника) // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 12-1. — С. 31—43. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_121_0_31.

15. *Рыбникова Л. С.*, *Рыбников П. А.*, *Галин А. Н.* Процессы формирования подотвальных вод и мероприятия по минимизации их влияния на гидросферу (на примере Лёвихинского рудника, средний Урал) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2025. — Т. 336. — № 2. — С. 102—115.

16. *Лебзин М. С.* Обоснование технологии консервации породных отвалов сорбент-ориентированным методом: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. — Екатеринбург, 2025. — 27 с.

17. *Зеньков И. В.*, *Нефедов Б. Н.*, *Юронен Ю. П.*, *Кирюшина Е. В.*, *Вокин В. Н.* Технологии формирования рельефа породных отвалов для лесной рекультивации // Экология и промышленность России. — 2015. — Т. 19. — № 10. — С. 22—26.

18. *Федоров С. А.*, *Завьялов С. С.*, *Малышев А. Н.* Новые данные по вещественному составу отвалов Левихинского рудника (Средний Урал) // Уральская минералогическая школа. — 2021. — № 27. — С. 122—124.

19. *Рыбникова Л. С.*, *Рыбников П. А.* Эколого-экономическая оценка шахтных вод на примере затопленных медноколчеданных рудников Урала // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. — 2016. — № 1. — С. 52—65.

20. *Рыбникова Л. С.*, *Рыбников П. А.*, *Наволокина В. Ю.* Оценка влияния затопленного Левихинского медноколчеданного рудника на качество поверхностных вод реки Тагил // Проблемы недропользования. — 2019. — № 3 (22). — С. 155—160. ГИАБ

## REFERENCES

1. Ovchinnikova T. V., Uflyand G. S. Expansion of the Northern copper-zinc mine without damaging the environment of the Northern Urals. *Gornyi Zhurnal*. 2011, no. 7, pp. 31—34. [In Russ].

2. Voronova A. E., Kiseleva D. V., Okuneva T. G. Assessment of the ecogeochemical status of rivers flowing through the territory of the Denezhkin Kamen Nature Reserve. *Problemy teoreticheskoy i eksperimental'noy khimii* [Problems of theoretical and experimental chemistry], Ekaterinburg, 2024, 75 p.

3. Komin A. V. *Zashchita vodnykh ob"ektov ot zagryazeniya stokom s otvalov medno-tsinkovykh rud (na primere Levikhinskogo rudnika)* [Protection of water bodies from pollution by runoff from copper-zinc ore dumps (using the Levikhinsky mine as an example)], Candidate's thesis, Ekaterinburg, 2000, 17 p.

4. Vysotsky S. P., Kozyr D. A. Environmental monitoring of waste dumps of mining agglomerations. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2021, vol. 332, no. 11, pp. 37—46. [In Russ].

5. Zhukovskaya E. P. *Metodika operativnoy otsenki ekologicheskoy opasnosti otkhodov pri razrabotke medno-tsinkovykh mestorozhdeniy Urala i perspektivnye sposoby ikh neytralizatsii* [Methodology for operational assessment of environmental hazard of waste during development of copper-zinc deposits in the Urals and promising methods for their neutralization], Candidate's thesis, Ekaterinburg, 2003, 25 p.

6. Dusengemungu L., Mubemba B., Gwanama C. Evaluation of heavy metal contamination in copper mine tailing soils of Kitwe and Mufulira, Zambia, for reclamation prospects. *Scientific Reports*. 2022, vol. 12, article 11283. DOI: 10.1038/s41598-022-15458-2.

7. Leiva González J., Onederra I. Environmental management strategies in the copper mining industry in chile to address water and energy challenges — Review. *Mining*. 2022, vol. 2, pp. 197—232. DOI: 10.3390/mining2020012.

8. Zlobin N. I. Assessment of pollution of water bodies of the Denezhkin Kamen Nature Reserve from the Shemurskoye deposit. *XXI century. Technosphere safety*. 2021, vol. 6, no. 4, pp. 395—407. [In Russ].

9. Kvashnina A. E., Vozmitel F. K., Khamedov V. A. Dynamics of forest vegetation mortality in the area of mineral extraction at the deposits of the northern copper-zinc mine in the Sverdlovsk region. *Forest Science Issues*. 2023, vol. 6, no. 1, pp. 104—115. [In Russ].

10. Tuchina M. V., Ermakova Yu. V. Reserve availability of copper mining enterprises in the southern and middle Urals, the state and prospects for the development of their raw material base. *Ores and Metals*. 2019, no. 3, pp. 12—21. [In Russ].

11. Ovchinnikova T., Solodovnikov D. In the fight against acidic waters. *TekhNadzor*. 2017, no. 8 (129), pp. 71. [In Russ].

12. Antoninova N. Yu., Kornilkov S. V., Kuznetsova Ya. A., Shubina L. A. Environmental aspects of overburden dump reclamation. *Problems of Subsoil Use*. 2024, no. 1(40), pp. 57—66. [In Russ].

13. Dostovalova D. A., Podgorodetsky N. S. Forecasting the level of professional risk during waste dump reclamation. *Bulletin of the Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2023, no. 3 (161), pp. 48—55. [In Russ].

14. Degtyarev S. A., Boltyrov V. B., Prokopyeva A. A., Shaikhutdinova M. M. Justification of the inventory system for objects of accumulated damage to the environment (using the Levikhinsky mine as an example). *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 12-1, pp. 31—43. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_121_0_31.

15. Rybnikova L. S., Rybnikov P. A., Galin A. N. Processes of formation of dump waters and measures to minimize their impact on the hydrosphere (using the Levikhinsky mine as an example, Middle Urals). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2025, vol. 336, no. 2, pp. 102—115. [In Russ].

16. Lebzin M. S. *Obosnovanie tekhnologii konservatsii porodnykh otvalov sorbent-orientirovannym metodom* [Justification of the technology for conservation of rock dumps using the sorbent-oriented method], Candidate's thesis, Ekaterinburg, 2025, 27 p.

17. Zenkov I. V., Nefedov B. N., Yuronen Yu. P., Kiryushina E. V., Vokin V. N. Technologies for the formation of rock dump relief for forest reclamation. *Ecology and Industry of Russia*. 2015, vol. 19, no. 10, pp. 22—26. [In Russ].

18. Fedorov S. A., Zavyalov S. S., Malyshev A. N. New data on the material composition of the Levikhinsky mine dumps (Middle Urals). *Ural Mineralogical School*. 2021, no. 27, pp. 122—124. [In Russ].

19. Rybnikova L. S., Rybnikov P. A. Ecological and economic assessment of mine waters using the example of flooded copper pyrite mines in the Urals. *Water management of Russia: problems, technologies, management*. 2016, no. 1, pp. 52—65. [In Russ].

20. Rybnikova L. S., Rybnikov P. A., Navolokina V. Yu. Assessment of the impact of the flooded Levikhinsky copper pyrite mine on the quality of surface waters of the Tagil River. *Problems of Subsoil Use*. 2019, no. 3 (22), pp. 155—160. [In Russ].

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Стороженко Любовь Александровна*[1] — канд. геол.-минерал. наук,
зав. кафедрой, e-mail: stor_luba@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0003-4185-956X,
*Болтыров Владимир Босхаевич*[1] — д-р геол.-минерал. наук,
профессор, профессор, e-mail: boltyrov34@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-5564-0054,
*Лебзин Максим Сергеевич*[1] — младший научный сотрудник,
e-mail: az_ma@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-5959-135X,
*Дегтярев Сергей Антонович*[1] — преподаватель СПО,
e-mail: sergey.degtyarev@m.ursmu.ru,
ORCID ID: 0000-0001-7046-3244,
[1] Уральский государственный горный университет.
**Для контактов**: Болтыров В.Б., e-mail: boltyrov34@mail.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*L.A. Storozhenko*[1], Cand. Sci. (Geol. Mineral.),
Head of Chair, e-mail: stor_luba@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0003-4185-956X,
*V.B. Boltyrov*[1], Dr. Sci. (Geol. Mineral.),
Professor, Professor, e-mail: boltyrov34@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-5564-0054,
*M.S. Lebzin*[1], Junior Researcher, e-mail: az_ma@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-5959-135X,
*S.A. Degtyarev*[1], Lecturer of Secondary Vocational Education,
e-mail: sergey.degtyarev@m.ursmu.ru,
ORCID ID: 0000-0001-7046-3244,
[1] Ural State Mining University, 620144, Ekaterinburg, Russia.
**Corresponding author**: V.B. Boltyrov, e-mail: boltyrov34@mail.ru.

Получена редакцией 02.07.2025; получена после рецензии 11.10.2025; принята к печати 10.11.2025.
Received by the editors 02.07.2025; received after the review 11.10.2025; accepted for printing 10.11.2025.