ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2025;(12-1):117-130
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 504.06 DOI: 10.25018/0236_1493_2025_121_0_117

ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ НОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРИРОДНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОЧИСТКИ КИСЛЫХ РУДНИЧНЫХ ВОД

Б.Б. Зобнин[1], Л.А. Мочалова[1]

[1] Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия,
e-mail: lyudmila.mochalova@m.ursmu.ru

Аннотация: Рассмотрена проблема, связанная с управлением процессами, происходящими на постэксплуатационном этапе функционирования природно-технологической системы, образованной законсервированными горными выработками. Целью исследования является построение математической модели оценки эффективности технологий ликвидации объектов накопленного вреда окружающей среде при их применении в условиях природно-технологической системы, которая образована медно-колчеданными шахтами, выведенными на мокрую консервацию. Модель базируется на результатах онтолого-ориентированного анализа и позволяет сравнивать технологии с учетом того фактора, что каждый из источников эколого-экономического ущерба, принадлежащих к природно-технологической системе, является одновременно ресурсом востребованных товарных продуктов. Использование существующих технологий приводит к блокированию минеральных ресурсов, содержащихся в кислых рудничных водах. Предложена новая технология, уже прошедшая стендовые испытания, – технология очистки кислых рудничных вод с извлечением товарных продуктов – ферритов. На примере такого объекта накопленного вреда окружающей среде, как территория Левихинского рудного поля, приведено экологическое и экономическое обоснование эффективности данной технологии. По сравнению с существующими технологиями предлагаемая является более эффективной с точки зрения предотвращения части эколого-экономического ущерба и получения дополнительного дохода от продажи товарного продукта.

Ключевые слова: природно-технологическая система, медно-колчеданные шахты, мокрая консервация, кислые рудничные воды, товарный продукт, технология ликвидации вреда, эколого-экономический ущерб, дополнительный доход, эффективность.

Благодарность: Проект поддержан грантом Российского научного фонда 24-17-20033 и Правительством Свердловской области.

Для цитирования: *Зобнин Б. Б., Мочалова Л. А.* Обоснование эффективности новой технологии функционирования природно-технологической системы очистки кислых рудничных вод // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 12-1. – С. 117–130. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_121_0_117.

Substantiation of the effectiveness of a new technology for the functioning of a natural technological system for the treatment of acid mine waters

B.B. Zobnin[1], L.A. Mochalova[1]

[1] Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia, e-mail: lyudmila.mochalova@m.ursmu.ru

Abstract: The article is devoted to solving an urgent problem related to the management of processes occurring at the post-operational stage of the functioning of the natural technology system formed by mothballed mining operations. The purpose of the study is to build a mathematical model for evaluating the effectiveness of technologies for eliminating accumulated environmental damage when used in a natural technology system formed by copper-pyrite mines that have been wet-preserved. The model is based on the results of an ontology-oriented analysis and allows comparing technologies, taking into account the fact that each of the sources of environmental and economic damage belonging to the natural technology system is at the same time a resource of demanded commodity products. The use of existing technologies leads to the blocking of mineral resources contained in acidic mine waters. A new technology has been proposed that has already passed bench tests – a technology for purifying acidic mine waters with the extraction of commercial products – ferrites. Using the example of such an ONVOS as the territory of the Levikhinsky ore field, the ecological and economic justification of the effectiveness of this technology is given. Compared to existing technologies, the proposed one is more effective in terms of preventing some of the environmental and economic damage and generating additional income from the sale of a marketable product.

Key words: natural technology system, copper-pyrite mines, wet preservation, acid mine waters, marketable product, harm reduction technology, environmental and economic damage, additional income, efficiency.

Acknowledgements: The project was supported by a grant from the Russian Science Foundation 24-17-20033 and the Government of the Sverdlovsk Region.

For citation: Zobnin B. B., Mochalova L. A. Substantiation of the effectiveness of a new technology for the functioning of a natural technological system for the treatment of acid mine waters. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(12-1):117-130. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_121_0_117.

Введение

Завершение отработки большого числа месторождений в последние годы привело к необходимости управления процессами, происходящими на постэксплуатационном (постмайнинговом) этапе функционирования природно-технологической системы (ПТС), образованной законсервированными горными выработками. Изучением данных процессов занимаются отечественные и зарубежные специалисты. В Европе для этого созданы специализированные структуры, такие как Британская независимая некоммерческая организация «Post-mining Alliance», связанная с устойчивым развитием участков шахт, и Европейская ассоциация угля и бурого угля «Euracoal». В Соединенных Штатах этим вопросом занимается Национальная горная ассоциация («National Mining Association»). В России существует ФГУП «Федеральный экологический оператор» (ФГУП «ФЭО») — предприятие госкорпорации «Росатом», являющееся разработчиком алгоритма реализации проектов в сфере ликвидации накопленного вреда.

К ПТС, которые образованы законсервированными горными выработками, можно отнести медно-колчеданные шахты, выведенные на мокрую консервацию. Они состоят из нескольких источников эколого-экономического ущерба: самоизливающейся шахтной воды, подотвальных вод, породных отвалов и т.д., которые, по сути, одновременно являются ресурсами востребованных товарных продуктов. Для обеспечения и экологической, и экономической эффективно-

сти функционирования таких ПТС важно применение правильной технологии очистки кислых рудничных вод (КРВ) при ликвидации объектов накопленного вреда окружающей среде (ОНВОС) [1, 2].

Определение такой технологии является элементом стратегического выбора, заключающегося в анализе существующих и новых технологий, а затем принятии решения об использовании одной из них. Зачастую наибольшая эффективность свойственна новым технологиям. В науке переход от одной (существующей) технологии к другой (новой) именуется технологическим разрывом [3]; он происходит скачкообразно в различных отраслях и зависит от научно-технологических, правовых, экологических, социальных, экономических и других факторов.

В случае выбора технологии ликвидации ОНВОС важно учитывать не только экологические и социальные критерии, связанные с уменьшением натурального ущерба от загрязнения окружающей среды, но и экономические критерии, базирующиеся на величинах предотвращенного эколого-экономического ущерба и дополнительного дохода, получаемого в результате извлечения и продажи получаемых товарных продуктов.

Выбор технологии ликвидации ОНВОС целесообразно осуществлять, основываясь на математическом моделировании, которое позволяет с единых позиций рассматривать экологический и минерально-ресурсный потенциалы конкретной территории с целью выбора взаимоувязанного комплекса сценариев развития этой территории в производственной и финансово-инвестиционных сферах. Моделирование способствует выявлению возможных изменений физических, химических и биологических состояний окружающей среды, вызванных функционированием ПТС, и при этом требует соответствующей информационной поддержки [4, 5].

Математическое моделирование предполагает определение принципов функционирования ПТС. Следует отметить, что в работе [6] приведены принципы, обеспечивающие устойчивое, экологически сбалансированное развитие ПТС, основанной на освоении участка недр на базе комбинированных геотехнологий. Однако в ней отсутствует конкретизация этих принципов применительно к ПТС, образованной медно-колчеданными шахтами, выведенными на мокрую консервацию.

Целью исследования является построение математической модели оценки эффективности технологий ликвидации объектов накопленного вреда окружающей среде при их применении в условиях природно-технологической системы, которая образована медно-колчеданными шахтами, выведенными на мокрую консервацию.

Для построения математической модели необходима формализация наблюдаемых в ПТС процессов [7]. Следует констатировать тот факт, что в настоящее время отсутствует формализованное эколого-экономическое описание функционирования ПТС очистки КРВ, изливающихся из шахт, которые выведены на мокрую консервацию [8]. Это является серьезным препятствием для управления этой ПТС как иерархическим сложным комплексом с неполным аналитическим описанием.

Материалы и методы

Необходимое для математического моделирования описание ПТС состоит из характеристики природной и технологической частей. Природная часть рассматривается как объединение двух групп объектов: сосредоточенных источников самоизлива КРВ и сульфидных отвалов горных пород [9].

На изучаемом ОНВОС — территории Левихинского рудного поля — находится 11 отвалов общей площадью 0,3 км^2 и объемом 1,7 млн м^3. Самый большой из них имеет площадь 22,6 га и объем 1,45 млн м^3 и расположен в южной части возле шахты «Левиха-XII». Отвалы сложены пустыми вмещающими породами, которые содержат вкрапленные сульфиды, представленные преимущественно пиритом, халькопиритом, сфалеритом, марказитом, и вскрышными породами, состоящими из амфиболитов и серицитовых сланцев [10]. Доля попутных компонентов в стоимости товарной продукции достигает в медных месторождениях 45—50%, а в полиметаллических — 70% [11]. Состояние отвалов горных пород Левихинского рудника характеризуется массой полезных компонентов в 900 т, среди которых — железо, алюминий, медь, цинк и марганец [12].

Технологическая часть (насосное оборудование, станции нейтрализации КРВ, пруд-отстойник) характеризуется возрастной плотностью $m(t, \tau)$ используемого оборудования, имеющего в момент времени t-й срок эксплуатации в пределах от τ до $\tau + d\tau$. Косвенной оценкой возраста отвалов является степень загрязнения подотвальных вод. Возрастная плотность оборудования определяет вероятность наступления критической ситуации, когда срок эксплуатации оборудования истекает и необходимо в условиях дефицита времени принять решение о выборе технологии ликвидации ОНВОС.

В силу указанной специфики наблюдается ситуация принятия решений, в которой нечетко известно состояние ПТС и неточно определена полезность альтернатив в различных ее состояниях.

Предметом анализа являются сценарии перехода ПТС из существующего состояния в желаемое на этапе постмайнинга [13].

Экономика перехода определяется удельными затратами ресурсов на 1 м^3 очищаемой воды и наличием трендов, обусловленных «первичным смывом», продолжающимся десятки лет после перевода шахт на мокрую консервацию; изменением цен на материалы и энергоносители; увеличением во времени эколого-экономического ущерба, который наносится шахтами, выведенными на мокрую консервацию.

Сценарий перехода, описываемый динамической оптимизационной задачей, заключается в реализации гарантированного уклонения от запрещенной области, в которой эколого-экономические потери максимальны. Для этого предлагаемая стратегия управления каждой сложившейся позиции (t_*, x_*) сопоставляет физически реализуемое правило обработки будущей траектории, развитие которой и определяет момент переключения $t^* \geqslant t_*$, т.е. момент реализации мероприятия, направленного на уклонение от запрещенной области.

Функционирование ПТС может быть описано системой нелинейных дифференциальных уравнений следующего вида:

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), \alpha) \qquad (1)$$

с начальными условиями

$$x(t_0) = x_0, \qquad (2)$$

где t — время, $t \in [t_0, t_0 + T], T > 0$ — фиксированное число; $x = x(t) \in R^m$ — функция состояния системы (1), (2); $x_0 \in R^m$ — детерминированный вектор; $u = u(t) \in R^q$ — вектор управляемых параметров; предполагается, что функция $u(t)$ и ее производные равномерно ограничены; A — открытое связное множество: $\alpha \in A \subset R^S$.

Для описания функционирования сложного технологического комплекса на верхнем иерархическом уровне используем математический аппарат ли-

нейных дифференциальных игр сближения-уклонения [14].

Эффективность функционирования ПТС определяется по формуле

$$\dot{S} = U + \Psi,\ S(0) = S_0, \qquad (3)$$

где U — управление игрока-союзника, стремящегося минимизировать потери на этапе постмайнинга; Ψ — управление игрока-противника, делающего ошибочные шаги для достижения заданной цели (причиной ошибочных шагов является отсутствие необходимой информации у игрока-противника или неправильная ее интерпретация).

Ресурсные ограничения, которые должны быть учтены при решении задачи управления, касаются: информационных ресурсов (информация об инженерной инфраструктуре, проектная и исполнительная документация, информация об обслуживании и ремонте оборудования); времени на планирование и организацию работ (графики выполнения работ, трудозатраты); человеческих ресурсов (состав, численность, квалификация); инструментов и материалов.

Задача выбора технологии для каждого из источников эколого-экономического ущерба формализуется как задача целочисленного программирования.

Оптимальный набор проектов:

$$L = \sum_{i=1}^{n} x_i \cdot NPV_i \to \max, \qquad (4)$$

где NPV — чистая приведенная стоимость, используемая инвесторами как показатель целесообразности вложений в конкретный проект.

Управляемыми переменными являются: x_i — булевы переменные ($x_i = 1$, если i-я стратегия реализована, $x_i = 0$ — в противном случае). Ограничения, отражающие зависимости между проектами, имеют следующий вид:

для взаимоисключающих проектов

$$x_i + x_j \leqslant 1, \qquad (5)$$

для взаимообусловленных проектов

$$x_i - x_j = 0. \qquad (6)$$

При реализации отдельных мероприятий в разные моменты времени проекты рассматриваются как взаимоисключающие.

При решении задачи необходимо учесть ограничения по объему капитальных вложений, распределенных по горизонтам планирования:

$$\sum_{i}^{n} A_{it} \cdot r_{it}^{k} \cdot x_i \leq R_t^k, \qquad (7)$$

где R^k_t — объем капиталовложений на развитие в t-м году, руб./год; $r_{it}^{\ k}$ — расход ресурсов k-го типа при внедрении i-го мероприятия в t-м году, руб./м^3; A_{it} — производственная мощность при внедрении i-го мероприятия, м^3/год.

Полная экономическая эффективность природоохранных мероприятий ($Э_з$) определяется по формуле, сформированной на базе «Временной типовой методики определения экономической эффективности природоохранных мероприятий и оценки экономического ущерба, причиняемого народному хозяйству загрязнением окружающей среды» (1986 г.):

$$Э_з = (У_1 - У_2) + \Delta Д)/(С + Е_н \cdot К), \qquad (8)$$

где $У_1$ — расчетная величина эколого-экономического ущерба, который имеет место до внедрения природоохранного мероприятия, руб./год; $У_2$ — величина остаточного эколого-экономического ущерба, исчисляемого после проведения природоохранного мероприятия, руб./год; $\Delta Д$ — величина дополнительного дохода, получаемого отраслью или предприятием вследствие внедрения природоохранного мероприятия либо от реализации востребованного продукта, например, ферритового сырья, руб./год; $С$ — величина годовых эксплуатационных расходов на содержание и обслу-

живание сооружений природоохранного назначения; K — величина капитальных вложений в строительство (создание) природоохранных сооружений, руб.; $E_н$ — нормативный коэффициент экономической эффективности капитальных вложений, обычно принимаемый равным 0,12 — 0,15.

Значение $Э_з$ говорит об экономической эффективности природоохранного мероприятия: если $Э_з > 1$, то мероприятие экономически эффективно; если $Э_з < 1$, то мероприятие неэффективно.

Размер ущерба ($У$, руб.), причиняемого водному объекту сбросом вредных (загрязняющих) веществ в составе подотвальных вод, рассчитывается по методике исчисления размера вреда, причиненного водным объектам вследствие нарушения водного законодательства (Министерство природных ресурсов, 2009. — 41 с.).

Результаты и их обсуждение

Для отображения предметной области используем онтолого-ориентированный

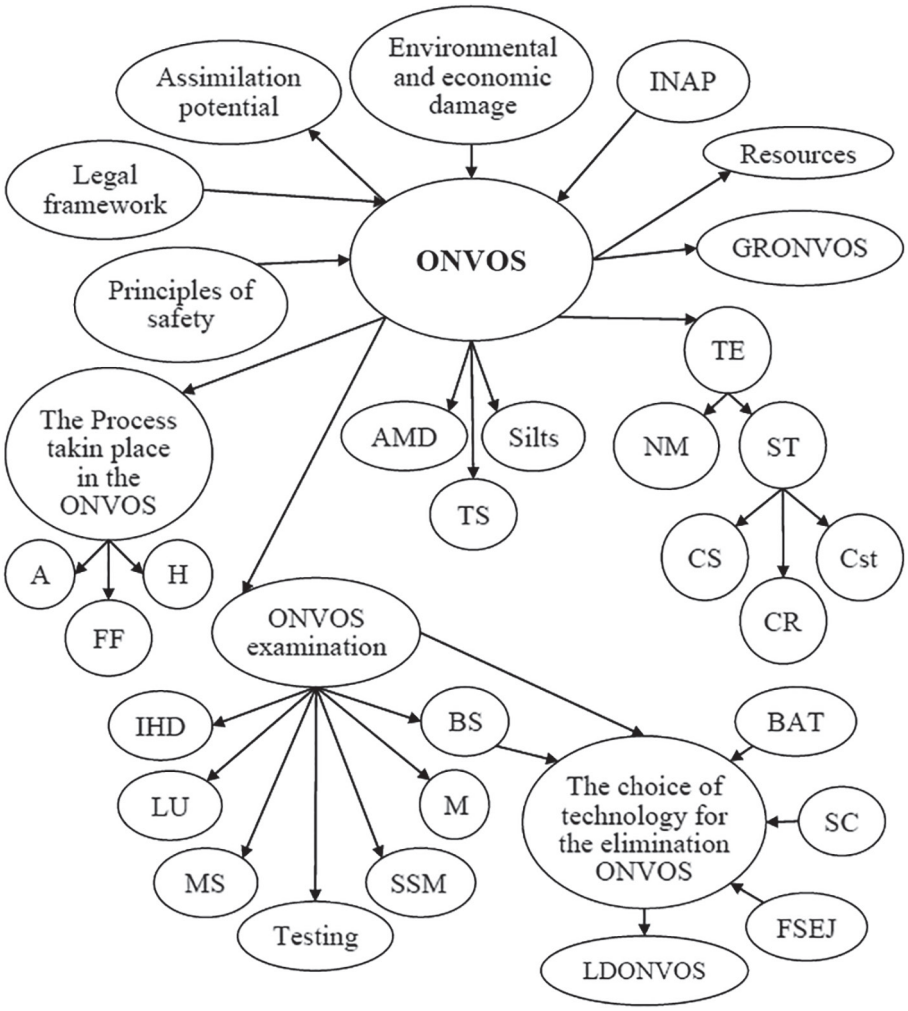

Рис. 1. Фрагмент схемы онтолого-ориентированного анализа предметной области исследования
Fig. 1. Fragment of the ontology-oriented analysis scheme of the subject area of research

анализ, позволяющий разделить эффекты, обусловленные различными технологическими ситуациями, найти рациональные способы управления функционированием и развитием сложной ПТС и интегрировать в рамках единой и непротиворечивой модели информацию из различных источников.

Рассматриваемой предметной областью является управляемый переход шахт, выведенных на мокрую консервацию, на этап постмайнинга, заключающийся в создании технологии очистки КРВ и извлечения из них полезных компонентов, т.е. в переходе на замкнутый цикл использования материальных ресурсов, предполагающий ликвидацию ОНВОС.

На рис. 1 использованы сущности, характеризующие технологии обработки КРВ — существующую (нейтрализация известковым молочком) и предлагаемую (сонохимические превращения; струйный кавитатор; роторный кавитатор; статический кавитатор) [Заявка на выдачу патента № 2025117006/05(039892). Зобнин Б. Б., Кочетков В. В., Морозов А. Г., Королёв О. А., Федоров С. А., Наумов В. А., Глухов М. С. Способ очистки и нейтрализации кислых рудничных вод, образующихся при мокрой консервации медно-колчеданных и угольных шахт].

Обозначения: ONVOS — объект накопленного вреда окружающей среде (ОНВОС); GRONVOS — государственный реестр ОНВОС; INAP — Международное сообщество по профилактике кислотности (International Network for Acid Prevention), формирующее требования к технологии; Resources — ресурсы (финансовые, материальные, временные); Principles of safety — принципы безопасности; Assimilation potential — ассимиляционный потенциал; Legal Framework — правовая база; Environmental and economic damage — ущерб окружающей среде и экономике; AMD — кислые шахтные воды; TS — техногенные грунты; Sils — илы; TE — технология ликвидации ОНВОС; NM — нейтрализация известковым молочком; ST — сонохимические превращения; CS — струйный кавитатор; CR — роторный кавитатор; Cst — статический кавитатор; The Process taking place in the ONVOS — процессы, происходящие при ликвидации ОНВОС; FF — процессы первичного смыва («first flush»); A — автоподкисление; H — гидрогеологические процессы; ONVOS examination — обследование ОНВОС; IHD — серьезные внутренние повреждения; LU — уровень неопределенности; MS — шкалы измерений; Testing — опробование; SSM — пространственная ситуационная модель; M — мониторинг; BS — блокировки системы; The choice of technology for the elimination of accumulated environmental damage — выбор технологии ликвидации ОНВОС; LDONVOS — ликвидация ущерба, причиненного объектами накопленного вреда окружающей среде; BAT — наилучшие доступные технологии; SC — критерий выбора.

Правила выявления ОНВОС утверждены постановлением Правительства РФ № 2239 от 21 декабря 2023 г. Оценка ОНВОС включает в себя установление: массы или объема, классов опасности загрязняющих веществ (отходов); категории, видов разрешенного использования, площади земельных участков и акваторий, относящихся к ОНВОС; количества населения, проживающего в пределах территории, на которой окружающая среда вследствие расположения объекта НВОС находится под угрозой негативного воздействия. Реализация проекта ликвидации ОНВОС для крупных ПТС, таких как Левихинское или Дегтярское рудное поле, без использования онтологических моделей практически невозможно. Должно быть орга-

низовано взаимодействие и обеспечена координация действий всех субъектов, участвующих в работе, путем внедрения инновационных технологий организации, анализа и визуализации информации, критичной для ситуационного управления деятельностью, как в повседневном рабочем режиме, так и в чрезвычайных ситуациях. Это требует использования интегрированных информационных систем, включая, прежде всего, систему подготовки и принятия решений (СППР), а также основную и резервную систему SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition — диспетчерское управление и сбор данных).

Такой подход позволит обеспечить информационно-аналитическую поддержку участников проекта ликвидации ОНВОС [15].

На рис. 1 стрелки соединяют материнские и дочерние сущности. Каждый узел схемы определяет пространство проектных решений. Например, выбор технологии ликвидации ОНВОС дает ответ на вопрос: как с использованием наилучших доступных технологий для заданных критериев выбора ликвидировать данный ОНВОС и обеспечить допустимый сброс экотоксикантов в окружающую среду.

Применяем представленную ранее модель оценки эффективности технологий ликвидации ОНВОС в условиях ПТС, которая образована медно-колчеданными шахтами, выведенными на мокрую консервацию.

Эффективность существующей системы очистки КРВ Левихинского рудничного поля определяется следующими показателями: степень очистки эффективна для ионов алюминия (98%) и менее эффективна для сульфатов (45%). После сброса очищенных шахтных вод с рудника в р. Тагил (устье р. Левихи) превышения ПДК составляют: для цинка — в 8500 раз, для меди — в 5700 раз, для марганца — в 3500 раз, для железа — в 580 раз, для алюминия — в 100 раз, для сульфатов — в 27 раз [16].

Начальное значение эколого-экономического ущерба, имеющее тенденцию к увеличению в связи с его пространственным распространением, находим в соответствии с Методикой определения предотвращенного экологического ущерба, утвержденной Председателем Государственного комитета Российской Федерации по охране окружающей среды В.И. Даниловым-Данильяном 30 ноября 1999 г.

Желаемое состояние ПТС на этапе постмайнинга может быть описано как пересечение двух множеств $A \cap B$. Первое множество соответствует требованиям, предъявляемым к качеству очищенной воды в точке контроля перед сбросом этой воды во внешнюю среду. Второе множество соответствует требованиям к качеству извлекаемых из воды востребованных товарных продуктов. Существующее состояние ПТС описывается физико-химическими свойствами КРВ. Пересечение множеств соответствует технологиям, принадлежащим и первому и второму множеству. Эколого-экономический ущерб в желаемом состоянии равен нулю.

Рассматриваем новые технологии ликвидации ОНВОС для Левихинского рудного поля.

- Первая технология предлагает сохранение существующих станций нейтрализации известковым молоком КРВ и дополнение их аналогичной станцией для потока подотвальных вод [12]. Эколого-экономические потери для этой технологии рассчитываем с учетом следующего момента: очистка КРВ от различных форм железа, проводимая нейтрализационным способом, не обеспечивает осаждение катионов Fe^{2+} в виде малорастворимого гидроксида $Fe(OH)_2$ в силу высокого значения pH гидрато-

образования и требует применения различных окислителей для перевода катиона Fe^{2+} в Fe^{3+}, что сопряжено не только с дополнительными затратами, но и с проведением необходимого процесса деструкции — вывода из сточной воды побочных продуктов окисления.

Капитальные и эксплуатационные затраты на реализацию этой технологии приняты соответствующими существующим: капитальные затраты — 1,6 млн руб., эксплуатационные затраты — 43,7 млн руб./год.

• Вторая технология базируется на предыдущей и дополнительно предполагает переработку подотвальных вод известковым молоком с использованием комплексообразования [17]. Поток кислых подотвальных вод и приготовленное на станции нейтрализации известковое молоко поступают в очистное сооружение, состоящее из аэратора FUCHS OxyStar Aerators типа OS 15 (11 kW) [FUCHS OxyStar Aerator Brochure EN 2020-11. URL: https://www.fuchswater.com/wpcontent/uploads/2021/01/FUCHS_OxyStar_Aerator_Brochure_EN_2020-11.pdf] и отстойников радиального типа ОРС-65 со встроенной камерой флокуляции. В качестве примера может служить станция очистки шахтных вод Цшельн (Tzschelln) (Саксония, Германия) [FUCHS Water Treatment. Case Studies, 2021. URL: https://www.fuchswater.com /wpcontent/uploads/2021/01/FUCHS_Mine_Water_Treatment_Case_Studies_2021-01.pdf]. После радиального отстойника очищенная вода по самотечному трубопроводу поступает в р. Левиху и далее в р. Тагил. Итоговая эффективность очистки подотвальных вод составляет 99,9% [18], что позволяет очистить подотвальные воды от железа, марганца и сульфата до фоновых значений для р. Тагил. Однако после всей системы очистки все еще будут присутствовать повышенные концентрации меди и цинка. Капитальные затраты на строительство станции нейтрализации (строительно-монтажные, подготовительные работы и приобретение оборудования) составляют 2,0 млн руб. Эксплуатационные затраты (фонд оплаты труда, налоги, расходные материалы, электроэнергия, вода и известь порошкообразная) составляют 49,0 млн руб./год. Капитальные и эксплуатационные затраты на очистку воды по сравнению с первой технологией возрастают, поскольку требуют приобретения и использования дополнительного оборудования, но низкая надежность технологического комплекса по причинам, изложенным ниже, не позволяет достичь желаемого результата. Рост затрат компенсируется появлением предотвращенного эколого-экономического ущерба в размере 9,5 млн руб./год, а также дополнительного дохода от реализации вторичного сырья — 2,0 млн руб./год.

Основная характеристика процесса комплексообразования с последующей ультрафильтрацией — селективность мембран или степень извлечения ионов металлов (φ) — определяется по формуле

$$\varphi = (C_1 - C_2)\, C_1 \times 100\%, \qquad (9)$$

где C_1, C_2 — концентрации ионов металлов в исходном растворе и в пермеате, мг/дм^3.

Для ультрафильтрации характерны недостатки способа очистки обратным осмосом. Мембраны для обратного осмоса могут рассматриваться как промежуточный тип между мембранами с открытыми порами (микрофильтрационными и ультрафильтрационными) и плотными непористыми (газоразделительными) [19].

Следует отметить, что способ очистки — обратный осмос — имеет ряд минусов [Насосная станция [Электронный ресурс] // ClimBo : [сайт]. URL: https://Moskva.climbo.ru/brands/leo/].

Таблица 1

Концентрация загрязняющих веществ в шахтных и поверхностных водах до нейтрализации, мг/л
Concentration of pollutants in mine and surface waters before neutralization, mg/l

Точка отбора	pH	Cu	Zn	Fe	Mn	Сульфат-ионы	Объем шахтных поверхностных вод, м³/год
Левихинский рудник	3,63	17,6	175	1226	63	6889	1 401 711
Белореченский рудник	2,9	3,4	5,3	144	4	869	275 120
Ломовский рудник	3,59	2,2	4,9	7,7	6,2	826	156 868
Карпушихинский рудник	3,63	0,979	5,9	23,7	1,52	318	220 634
ПДК для рыбохозяйственных водоемов	6,5–8,5	0,001	0,01	0,1	0,01	100	

Во-первых, эксплуатационные расходы по их функционированию примерно на порядок выше подобного типа расходов при других методах очистки воды.

Во-вторых, обратный осмос — это один из самых низкопроизводительных методов водоподготовки. Мембраны пропускают воду медленно и имеют низкую производительность.

В-третьих, вода перед мембраной обратного осмоса должна обязательно пройти тщательную предварительную очистку на какой-либо установке с традиционной технологией очистки воды.

В-четвертых, технология очистки воды обратным осмосом, по сути, является самоедской: при работе системы обратного осмоса в дренаж сбрасывается до 75% очищаемой воды (с ней нужно что-то делать!). (При традиционных методах очистки воды в дренаж сбрасывается не более 5% очищаемой воды.) На выходе пользователь получает лишь 25…30% воды.

В-пятых, обратноосмотические мембраны легко забиваются сульфатами бария, стронция, карбонатом кальция, диоксидом кремния и ферросоединениями и требуют весьма частой замены.

• Третья технология, предлагаемая нами, является технологией очистки КРВ с извлечением из них товарного продукта — ферритового сырья — и характеризуется следующими эколого-экономическими показателями. По результатам лабораторных анализов КРВ, выделяемый из них сухой остаток, полученный методом центрифугирования при 4000 об/мин в течение 60 мин, составил после кавитационной обработки 0,1 г/л. Это соответствует 15 кг/ч при производительности 150 м³/ч. В условиях Левихинского рудника объем шахтных вод, подлежащих переработке, принят в объеме 1300 тыс. м³ в год, или 3562 м³/сут/, или 148 м³/ч (несколько меньше, чем в табл. 1). Капитальные и эксплуатационные затраты на реализацию этой технологии определяются наличием нескольких точек излива КРВ, необходимостью создания новой инфраструктуры и потребностью в переподготовке технологического персонала. Цена ферритового сырья, поставляемого компанией «Феррит-Холдинг», являющейся в настоящее время крупнейшим в России и странах СНГ поставщиком ферритовых материалов, составляет 1554,89 руб./кг при производительности по воде 15 м³/ч и относительной доле сухого остатка 0,1 кг/м³, стоимость дополнительной продукции (ферритового осадка): 1554,9 руб./кг · · 15 м³/ч · 24 ч/сут. · 0,1 кг/м³ = = 55 976 руб./сут., 20,4 млн руб./год.

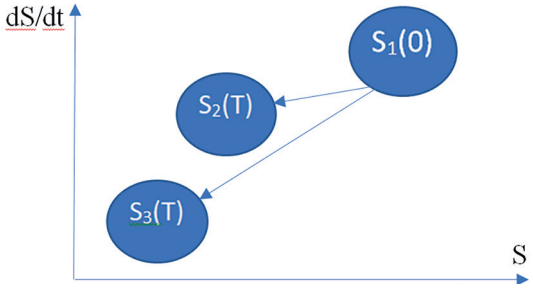

Рис. 2. Геометрическая интерпретация задачи выбора альтернативного варианта технологии
Fig. 2. Geometric interpretation of the problem of choosing an alternative technology option

Сопоставление предлагаемых технологий с использованием метода фазовой плоскости представлено на рис. 2. Каждая область фазового пространства соответствует состоянию системы. Когда ее состояние меняется, область *S* в фазовом пространстве движется по некоторой кривой. Результаты сопоставления альтернативных вариантов перехода из существующего состояния в желаемое сведены в табл. 2. Обозначения, введенные на рис. 2, соответствуют строчкам в табл. 2.

По оценке Л.С. Рыбниковой, величина эколого-экономического ущерба водным объектам только от сброса кислых шахтных вод после затопления Левихинского рудника составляет: $У_1$ = = 120 млн руб./год. По предлагаемой технологии значение остаточного ущерба: $У_2$ = 0. При величине $Е_н$ = 0,12 полная экономическая эффективность природоохранных мероприятий для предлагаемого варианта составляет: $Э_з$ = ((120 — — 0) + 20,4) / (100 + 0,12 · 60) = 1,31, что существенно выше 1; значит, природоохранное мероприятие экономически эффективно.

Сопоставление показателей эффективности, полученных по трем сравниваемым технологиям, позволяет сделать вывод о большей целесообразности ис-

Таблица 2

Сопоставление альтернативных проектов перехода ПТС из существующего состояния в желаемое
Comparison of alternative projects for the transition of the PTS from the existing state to the desired one

№ п/п	Наименование технологии	Капитальные затраты, млн руб.	Эксплуатационные затраты, млн руб./год	Предотвращенный эколого-экономический ущерб, млн руб./год	Дополнительный доход, млн руб./год	Экономическая эффективность природоохранного мероприятия
1	Нейтрализация КРВ известковым молоком	1,6	43,7	0	0	0
2	Нейтрализация известковым молоком с использованием комплексообразования	2,0	49,0	9,5	2,0	0,22
3	Предлагаемая технология обработки КРВ*	60,0	100,0	120,0	20,4	1,31

* Заявка на выдачу патента № 2025117006/05(039892). Зобнин Б. Б., Кочетков В. В., Морозов А. Г., Королёв О. А., Федоров С. А., Наумов В. А., Глухов М. С. Способ очистки и нейтрализации кислых рудничных вод, образующихся при мокрой консервации медно-колчеданных и угольных шахт.

пользования третьей, предлагаемой авторами технологии.

Заключение

По результатам проведенного исследования были сделаны следующие выводы.

1. Выбор варианта перехода ПТС, образованной законсервированными горными выработками, из существующего состояния в желаемое должен производиться с учетом того, что каждый из источников эколого-экономического ущерба (самоизливающаяся шахтная вода, подотвальные воды, породные отвалы и т.д.), принадлежащих к ПТС, является одновременно ресурсом востребованных товарных продуктов.

2. Применяемый подход позволяет с учетом возрастной плотности эксплуатируемого оборудования решить задачу стратегического выбора в области применения технологии — сохранять прежнюю или переходить на новую технологию.

3. Задача выбора технологии для каждого из источников эколого-экономического ущерба формализуется как задача целочисленного программирования.

4. Интеграция разнородной информации, используемой для решения задачи выбора технологии, обеспечивается при использовании онтолого-ориентированного анализа предметной области.

5. Предлагаемая нами технология очистки КРВ позволяет получить для медно-колчеданных месторождений осадок, представляющий собой ферритовое сырье, доход от реализации которого позволяет обеспечить самоокупаемость мероприятий, направленных на ликвидацию эколого-экономического ущерба.

6. Определяющим фактором выбора технологии является получение дополнительного дохода от реализации востребованной товарной продукции, извлекаемой в процессе очистки КРВ, что делает неконкурентоспособными технологии, блокирующие эту возможность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mosai A. K., Ndlovu G., Tutu H.* Improving acid mine drainage treatment by combining treatment technologies: A review // Science of the Total Environment. 2024, vol. 919. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.170806.

2. *Saleh T. A., Mustaqeem M., Khaled M.* Water treatment technologies in removing heavy metal ions from wastewater: A review // Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management. 2022, vol. 17, article 100617. DOI: 10.1016/j.enmm.2021.100617.

3. *Овчаренко Г. В., Алуханян А. А.* Управление технологическими разрывами при переходе на новую технологию // Вестник Ростовского государственного экономического университета «РИНХ». — 2009. — № 1. — С. 62—68.

4. *Miquel P. G.* Guide to the 25 best monitoring tools of 2025 [Электронный ресурс] // Thectoclub: [сайт]. [2025]. URL: https://thectoclub.com/tools/best-monitoring-tools/ (дата обращения: 29.08.2025).

5. *Xuan Xu, Sturm S., Samardzija Z., Scancar J., Markovicc K., Zuzek Rozmanab K.* A facile method for the simultaneous recovery of rare-earth elements and transition metals from Nd–Fe–B magnets // Green Chemistry. 2020, vol. 22, pp. 1105—1112. DOI: 10.1039/C9GC03325D.

6. *Каплунов Д. Р., Юков В. А.* Принципы устойчивого и экологически сбалансированного освоения недр на базе комбинированных геотехнологий // Горный журнал. — 2015. — № 11. — С. 32—36.

7. *Медяник Н. Л., Мишурина О. А., Муллина Э. Р., Варнавский Д. А.* К вопросу переработки техногенных месторождений на территории горнообогатительных комбинатов / Проблемы и перспективы эффективной переработки минерального сырья в 21 веке. «Плаксинские чтения»: материалы международной конференции. — Иркутск: Репроцентр А1, 2019. — С. 386—389.

8. *Liu T., Chen J.* Extraction and separation of heavy rare earth elements: A review // Separation and Purification Technology. 2021, vol. 276, article 119263. DOI: 10.1016/j.seppur.2021.119263.

9. *Фетисова Н. Ф.* Исследование форм миграции металлов в реках, подверженных влиянию шахтных вод Кизеловского угольного бассейна // Известия Томского политехнического

университета. Инжиниринг георесурсов. — 2021. — Т. 332. — № 1. — С. 141—152. DOI: 10.18799/24131830/2021/1/3007.

10. *Мормиль С. И.*, *Сальников В. И.*, *Амосов Л. А.*, *Хасанова Г. Г.*, *Семячков А. И.*, *Зобнин Б. Б.*, *Бурмистренко А. В.* Техногенные месторождения Урала и оценка их воздействия на окружающую среду. — Екатеринбург, 2002. — 206 с.

11. *Быховский Л. З.*, *Машковцев Г. А.*, *Самсонов Б. Г.*, *Эпштейн Е. М.* Рациональное использование недр: проблемы и пути решения. — М., 1997. — 44 с.

12. *Рыбникова Л. С.*, *Рыбников П. А.*, *Галин А. Н.* Процессы формирования подотвальных вод и мероприятия по минимизации их влияния на гидросферу (на примере Левихинского рудника, Средний Урал) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2025. — Т. 336. — № 2. — С. 102—115. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4517.

13. *Nambiar A.*, *Mundra D.* An overview of data warehouse and data lake in modern enterprise data management // Big Data and Cognitive Computing. 2022, vol. 6, no. 4, article 132. DOI: 10.3390/bdcc6040132.

14. *Зобнин Б. Б.*, *Морина С. И.* Об одной задаче управления с ограничением на число переключений // Известия Академии наук. Теория и системы управления. — 2000. — № 2. — С. 72—77.

15. *Шведин Б. Я.* Онтология предприятия: экспириентологический подход. Технология построения онтологической модели предприятия. — М.: Ленанд, 2010. — 240 с.

16. *Рыбникова Л. С.*, *Наволокина В. Ю.* Обоснование мероприятий по минимизации воздействия кислых шахтных вод на гидросферу (на примере Левихинского медноколчеданного месторождения, Свердловская обл.) // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 5-2. — С. 245—256. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_52_0_245.

17. *Насчетникова О. Б.*, *Соколкина А. С.*, *Шабунин А. Ф.*, *Никифоров А. Ф.* Технология очистки кислых шахтных вод с применением метода комплексообразования-ультрафильтрации // Градостроительство и архитектура. — 2024. — Т. 14. — № 2. — С. 9—14. DOI: 10.17673/Vestnik.2024.02.02.

18. *Долина Л. Ф.* Современная техника и технологии для очистки сточных вод от солей тяжелых металлов. — Днепропетровск: Континент, 2008. — 255 с.

19. *Черкасов С. В.* Обратный осмос. Теория, практика, рекомендации // СОК. — 2005. — № 11. URL: https://www.c-o-k.ru/articles/obratnyy-osmos-teoriya-praktika-rekomendacii (дата обращения: 29.08.2025). ГИАБ

REFERENCES

1. Mosai A. K., Ndlovu G., Tutu H. Improving acid mine drainage treatment by combining treatment technologies: A review. *Science of the Total Environment*. 2024, vol. 919. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.170806.

2. Saleh T. A., Mustaqeem M., Khaled M. Water treatment technologies in removing heavy metal ions from wastewater: A review. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*. 2022, vol. 17, article 100617. DOI: 10.1016/j.enmm.2021.100617.

3. Ovcharenko G. V., Alukhanyan A. A. Management of technological gaps during the transition to a new technology. *Vestnik of Rostov state university of economics (RINH)*. 2009, no. 1, pp. 62—68. [In Russ].

4. Miquel P. G. *Guide to the 25 best monitoring tools of 2025*. Thectoclub, 2025, available at: https://thectoclub.com/tools/best-monitoring-tools/ (accessed 29.08.2025).

5. Xuan Xu, Sturm S., Samardzija Z., Scancar J., Markovicc K., Zuzek Rozmanab K. A facile method for the simultaneous recovery of rare-earth elements and transition metals from Nd–Fe–B magnets. *Green Chemistry*. 2020, vol. 22, pp. 1105—1112. DOI: 10.1039/C9GC03325D.

6. Kaplunov D. R., Yukov V. A. Principles of sustainable and ecologically balanced development of subsurface resources based on combined geotechnologies. *Gornyi Zhurnal*. 2015, no. 11, pp. 32—36. [In Russ].

7. Medyanik N. L., Mishurina O. A., Mullina E. R., Varnavsky D. A. On the issue of processing technogenic deposits on the territory of mining and processing plants. *Problemy i perspektivy effektivnoy pererabotki mineral'nogo syr'ya v 21 veke. «Plaksinskie chteniya»: materialy mezhdunarodnoy konferentsii* [Problems and prospects of efficient processing of mineral raw materials in the 21st century. «Plaksin readings»: materials of the international conference], Irkutsk, 2019, pp. 386—389. [In Russ].

8. Liu T., Chen J. Extraction and separation of heavy rare earth elements: A review. *Separation and Purification Technology*. 2021, vol. 276, article 119263. DOI: 10.1016/j.seppur.2021.119263.

9. Fetisova N. F. Investigation of the forms of metal migration in rivers affected by the mine waters of the Kizel coal basin. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2021, vol. 332, no. 1, pp. 141—152. [In Russ]. DOI: 10.18799/24131830/2021/1/3007.

10. Mormil' S. I., Sal'nikov V. I., Amosov L. A., Khasanova G. G., Semyachkov A. I., Zobnin B. B., Burmistrenko A. V. *Tekhnogennye mestorozhdeniya Urala i otsenka ikh vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredu* [Technogenic deposits of the Urals and assessment of their environmental impact], Ekaterinburg, 2002, 206 p.

11. Bykhovskiy L. Z., Mashkovtsev G. A., Samsonov B. G., Epshteyn E. M. *Ratsional'noe ispol'zovanie nedr: problemy i puti resheniya* [Rational use and solutions], Moscow, 1997, 44 p.

12. Rybnikova L. S., Rybnikov P. A., Galin A. N. Processes of formation of subsurface waters and measures to minimize their impact on the hydrosphere (on the example of the Levikhinsky mine, Middle Urals). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2025, vol. 336, no. 2, pp. 102—115. [In Russ]. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4517.

13. Nambiar A., Mundra D. An overview of data warehouse and data lake in modern enterprise data management. *Big Data and Cognitive Computing*. 2022, vol. 6, no. 4, article 132. DOI: 10.3390/bdcc6040132.

14. Zobnin B. B., Morina S. I. On one management task with a limitation the number of switches. *Journal of Computer and System Sciences International*. 2000, no. 2, pp. 72—77. [In Russ].

15. Shvedin B. Ya. *Ontologiya predpriyatiya: ekspirientologicheskiy podkhod. Tekhnologiya postroeniya ontologicheskoy modeli predpriyatiya* [The ontology of the enterprise: an experiential approach. Technology for building an ontological model of an enterprise], Moscow, Lenand, 2010, 240 p.

16. Rybnikova L. S., Navolokina V. Yu. Justification of measures to minimize the impact of acid mine waters on the hydrosphere (using the example of the Levikhinsky copper-mineralized deposit, Sverdlovsk region). *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 5-2, pp. 245—256. [In Russ]. DOI: 10.25 018/0236_1493_2021_52_0_245.

17. Naschetnikova O. B., Sokolkina A. S., Shabunin A. F., Nikiforov A. F. Technology of acid mine water purification using the method of complexation-ultrafiltration. *Urban construction and architecture*. 2024, vol. 14, no. 2, pp. 9—14. [In Russ]. DOI: 10.17673/Vestnik.2024.02.02.

18. Dolina L. F. *Sovremennaya tekhnika i tekhnologii dlya ochistki stochnykh vod ot soley tyazhelykh metallov* [Modern equipment and technologies for wastewater treatment from heavy metal salts], Dnepropetrovsk, Kontinent, 2008, 255 p.

19. Cherkasov S. V. Reverse osmosis. Theory, practice, recommendations. *Santekhnika. Otoplenie. Konditsionirovanie*. 2005, no. 11, available at: https://www.c-o-k.ru/articles/obratnyy-osmos-teoriya-praktika-rekomendacii (accessed 29.08.2025). [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Зобнин Борис Борисович[1] — д-р техн. наук, профессор,
профессор, e-mail: zobninbb@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-0653-1131,
Мочалова Людмила Анатольевна[1] — д-р экон. наук, доцент,
зав. кафедрой, e-mail: lyudmila.mochalova@m.ursmu.ru,
ORCID ID: 0000-0002-0983-826X,
[1] Уральский государственный горный университет.
Для контактов: Мочалова Л.А., e-mail: lyudmila.mochalova@m.ursmu.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

B.B. Zobnin[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor,
e-mail: zobninbb@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-0653-1131,
L.A. Mochalova[1], Dr. Sci. (Econ.), Assistant Professor,
e-mail: lyudmila.mochalova@m.ursmu.ru,
ORCID ID: 0000-0002-0983-826X,
[1] Ural State Mining University, 620144, Ekaterinburg, Russia.
Corresponding author: L.A. Mochalova, e-mail: lyudmila.mochalova@m.ursmu.ru.

Получена редакцией 09.09.2025; получена после рецензии 14.10.2025; принята к печати 10.11.2025.
Received by the editors 09.09.2025; received after the review 14.10.2025; accepted for printing 10.11.2025.