

ОБ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРАХ БЕЗОТХОДНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ОТ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ РАЗРАБОТКИ МЕДНОКОЛЧЕДАНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Н.Ю. Антонинова¹, А.В. Собенин¹, А.И. Усманов¹, Я.А. Кузнецова¹

¹ Институт горного дела Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия, e-mail: arsob@yandex.ru

Аннотация: Представлена разработка безотходной технологии для совершенствования систем водоочистки при освоении медноколчеданных месторождений. Актуальность исследования обусловлена необходимостью снижения негативного воздействия разработки месторождений на водные объекты, особенно в регионах с развитой горнодобывающей промышленностью, где проблема загрязнения водных объектов тяжелыми металлами, такими как цинк, медь, железо и кадмий, стоит остро. Целью работы является повышение эффективности извлечения тяжелых металлов из высокоминерализованных сточных вод с использованием отходов производств. Разработана технология очистки промышленных сточных вод, основанная на применении вторичных ресурсов. Технологический процесс включает: аккумуляцию и усреднение стоков; основную очистку с использованием отходов железо-магниевого производства, обеспечивающую нейтрализацию тяжелых металлов и возможность одновременного получения ферро-магниевого мелиоранта; доочистку отходами гуминовых производств для сорбционного извлечения остаточных металлов с возможностью получения вторичного продукта в виде гуминового мелиоранта.

Ключевые слова: тяжелые металлы, горнодобывающая промышленность, сточные воды, очистка, реагенты, горнотехнические системы, отходы производства, проектирование.

Благодарность: Статья подготовлена в рамках Государственного задания № 075-00410-25-00 ПР. Тема 2 (2025–2027). Геоинформационное обеспечение системной оценки стратегий природосбережения при освоении ресурсов недр (FUWE-2025-0002), рег. № 1022040300092-1-1.5.1.

Для цитирования: Антонинова Н. Ю., Собенин А. В., Усманов А. И., Кузнецова Я. А. Об основных параметрах безотходной технологии очистки сточных вод от тяжелых металлов при проектировании разработки медноколчеданных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 12-1. – С. 90–103. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_121_0_90.

On the main parameters of waste-free technology for wastewater treatment from heavy metals in the design of the development of copper-crust deposits

N.Yu. Antoninova¹, A.V. Sobenin¹, A.I. Usmanov¹, Ya.A. Kuznetsova¹

¹ Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia, e-mail: arsob@yandex.ru

Abstract: The article presents the development of a waste-free technology for improving water treatment systems in the development of copper-mineralized deposits. The relevance of the study is due to the need to reduce the negative impact of mining on water bodies, especially in regions with a developed mining industry, where the problem of contamination of water bodies with heavy metals such as zinc, copper, iron and cadmium is acute. The aim of the work is to increase the efficiency of extracting heavy metals from highly mineralized wastewater using industrial waste. A technology for industrial wastewater treatment based on the use of secondary resources has been developed. The technological process includes: accumulation and averaging of effluents; basic purification using iron-magnesium production waste, which ensures the neutralization of heavy metals and the possibility of simultaneous production of ferro-magnesium ameliorant; post-treatment with humic production waste for sorption extraction of residual metals with the possibility of obtaining a secondary product in the form of humic ameliorant.

Key words: heavy metals, mining industry, wastewater, purification, reagents, mining engineering systems, production waste, engineering.

Acknowledgements: The article was prepared within the framework of the State Assignment No. 075-00410-25-00 PR. Topic 2 (2025-2027). Geoinformation support for the system assessment of environmental conservation strategies in the development of subsurface resources (FUWE-2025-0002), reg. No. 1022040300092-1-1.5.1.

For citation: Antoninova N. Yu., Sobenin A. V., Usmanov A. I., Kuznetsova Ya. A. On the main parameters of waste-free technology for wastewater treatment from heavy metals in the design of the development of copper-crusts deposits. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(12-1): 90-103. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_121_0_90.

Введение

Проектирование комплексов водоподведения и очистки сточных вод в рамках горнотехнических систем подлежит регламентации, определяемой Постановлением Правительства Российской Федерации № 87. В соответствии с этим нормативным актом проектная документация обязана включать разделы, посвященные водоснабжению и системам удаления сточных вод. Эти разделы должны содержать детальное обоснование применяемых технологий очистки, перечень используемых реагентов, спецификации оборудования и описание методов, обеспечивающих контроль качества очищенной воды [1, 2]. Необходимость такого строгого подхода обусловлена потенциальной опасностью загрязнения [3, 4] почвенного покрова и водных ресурсов химическими соеди-

нениями. В Свердловской области, где подавляющее количество промышленных отходов генерируется горнодобывающей отраслью, отмечается значительное загрязнение водных объектов [5]. При разработке медноколчеданных месторождений [6] основными загрязнителями являются тяжелые металлы [7, 8], в том числе цинк, медь, железо, кадмий и свинец. В связи с этим одним из приоритетных направлений является разработка и совершенствование существующих методов очистки воды от загрязнения тяжелыми металлами [9, 10].

В контексте освоения медноколчеданных месторождений актуальной целью является создание безотходной технологической схемы для улучшения функционирования горнотехнических систем. Ключевым аспектом является поиск оптимальных методов, обеспечивающих

максимальное извлечение тяжелых металлов и возможность дальнейшего использования образующихся материалов в хозяйственной деятельности.

Данное исследование сконцентрировано на разработке и совершенствовании производственных процессов в рамках организации комплексной системы водоочистки и водоотведения для проектируемых медноколчеданных месторождений.

Актуальной проблемой в сфере неропользования является отсроченный ввод в эксплуатацию очистных сооружений относительно начала освоения месторождения, что происходит даже при наличии утвержденной проектной документации.

Подобная практика обусловлена, в первую очередь, стремлением к минимизации капитальных вложений на начальных, наиболее затратных стадиях реализации проекта.

В рамках данного исследования предложен подход к снижению эксплуатационных затрат на системы водоочистки, основанный на применении отходов горнодобывающей промышленности в качестве реагентов и сорбентов. Это позволяет задействовать локальные, возобновляемые источники материалов, ранее не находившие применения в данной области [8, 11, 12].

Методика исследования

Для реализации этой идеи была проведена следующая последовательная работа.

1. Оценка химической эффективности материалов. Первостепенной задачей была экспериментальная оценка применимости двух типов отходов — железомагниевого производства (ЖМКС) и отходов гуминовых препаратов (ОГП) — в качестве реагентов и сорбентов. Для этого были исследованы ключевые показатели:

- сорбционная емкость, мг/г;
- степень извлечения загрязнителя из раствора, %;
- влияние начальной концентрации раствора, мг/л;
- влияние pH среды;
- оптимальное время контакта, мин;
- оптимальная дозировка материалов, г.

Эти данные были получены и подробно представлены в научных работах [8, 11, 12], послуживших основой для дальнейших разработок;

2. Установление параметров и разработка технологической схемы применения отходов в качестве реагентов и сорбентов на основании полученных экспериментальных данных:

- установление оптимальных параметров,
- разработка технологического процесса и схемы,
- описание этапа эксплуатации.

3. Оценка экономической эффективности: для доказательства целесообразности внедрения технологии был проведен комплексный экономический анализ, включающий: расчет капитальных затрат на создание системы водоочистки, определение размера предотвращаемого экологического ущерба и оценку экономической выгоды от внедрения.

Материалы

Техногенные отходы железо-магниевого производства представляют собой вторичный продукт, образующийся при переработке серпентинитового сырья с целью получения магниезиальных соединений. Данный материал имеет пастообразную консистенцию с характерной красно-бурой окраской. Химический состав отходов отличается значительной концентрацией магния (Mg), железа (Fe) и меди (Cu), что делает их потенциально ценным сырьевым ресурсом. Технологический процесс переработки вклю-

чает несколько последовательных стадий:

- сплавление серпентинита с сульфатом аммония;
- стадию водного выщелачивания полученного сплава;
- процесс фильтрации с последующим осаждением магниезальных соединений.

На заключительном этапе осажденные гидроксид и карбонат магния подвергаются многостадийной промывке и термической обработке, в результате чего получают конечный продукт — оксид магния [13]. Образующиеся при этом железо-магниевого отходы содержат значительное количество химических элементов в своем составе, что определяет перспективность их дальнейшего утилизационного использования. Благодаря малому размеру частиц и большой площади поверхности отходы обладают высокой химической активностью, что открывает возможности их применения в качестве железо-магниевого композиционного состава (ЖМКС) для нейтрализации сточных вод [8].

В ходе изготовления гуминовых препаратов образуются отходы производства (ОГП). Эти отходы формируются в процессе центрифугирования смеси, состоящей из верхового торфа, сапропеля, диатомита и гидроксида калия. ОГП представляет собой темно-серое, пастообразное вещество, которое является твердой фазой, отделяемой от конечного продукта при производстве гуминовых препаратов [12].

Результаты

Проведенные исследования [8, 11, 12] продемонстрировали высокую эффективность применения железо-магниевого композиционного состава (ЖМКС) и отходов гуминовых препаратов (ОГП) для очистки промышленных сточных вод от ионов тяжелых металлов (Cd, Zn, Fe, Cu).

Установлены следующие оптимальные параметры процесса очистки.

Технологические параметры:

- время контакта: 120–180 мин;
- дозировка реагентов: 10 г/л.

Максимальная концентрация металлов:

- для ЖМКС — 500 мг/л;
- для ОГП — 50 мг/л.

Технология подготовки реагентов:

- сушка исходного сырья до остаточной влажности ~10%;
- измельчение на дробильно-сушильном оборудовании;
- фракционирование до требуемой дисперсности (1 мм).

Технологический процесс

На основании представленных выше технологических параметров разработана технологическая схема применения отходов горнодобывающей промышленности в качестве реагентов и сорбентов для удаления тяжелых металлов из сточных вод (см. рисунок).

Для обеспечения эффективной очистки сточных вод от металлов применяют каскад прудов, представляющих собой гидротехнические сооружения. Сначала сточные воды поступают в пруд-отстойник, где происходит усреднение, отстаивание и сбор поверхностных стоков.

Процесс очистки сточных вод представляет собой двухэтапную технологию, реализуемую в специализированных прудах, оснащенных системами аэрации для насыщения воды кислородом и предотвращения застойных явлений.

На первом этапе проводится осаждение загрязнителей с использованием железо-магниевого композиционного состава. В ходе химической реакции происходят следующие процессы: нейтрализация ионов тяжелых металлов, коагуляция загрязнений с образованием хлопьевидного осадка, увеличение кон-

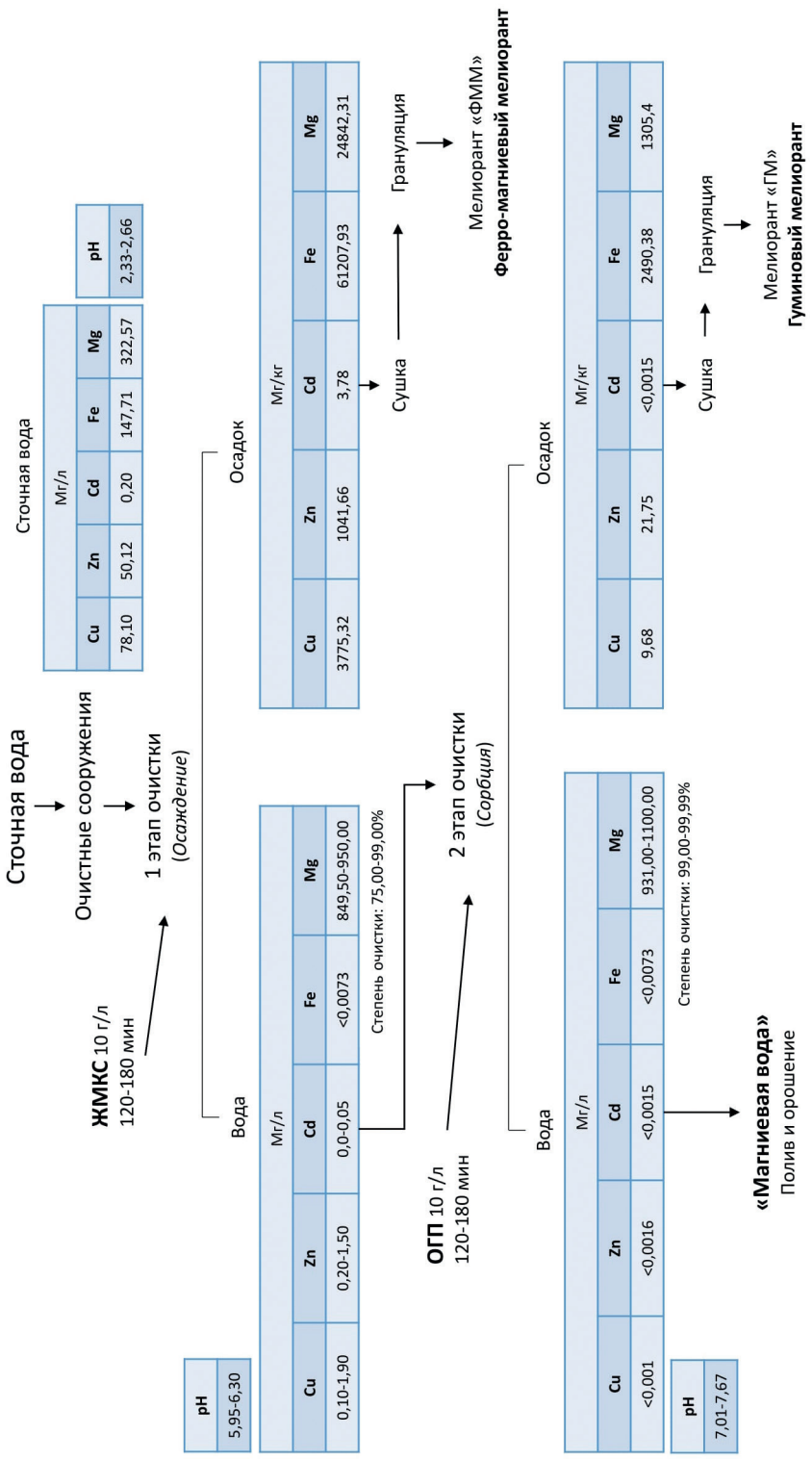


Схема безотходной технологии очистки сточных вод от тяжелых металлов с применением ЖМКС и ОГП
 Scheme of waste-free technology of wastewater treatment from heavy metals using ZHMKS and OGP

центрации ионов магния в водной среде и повышение уровня pH. Образованный осадок не утилизируется, а проходит обработку, включающую сушку и грануляцию, с получением ферро-магниевого мелиоранта, пригодного для дальнейшего применения.

Второй этап очистки основан на сорбционной технологии с применением отходов от производства гуминовых препаратов. Данный процесс обеспечивает доочистку раствора, а именно: удаление меди, кадмия и цинка, увеличение концентрации калия и окончательную стабилизацию pH среды до нейтральных значений.

Таблица 1

Изменение концентраций загрязняющих веществ на различных этапах очистки сточных вод

Changes in concentrations of pollutants at various stages of wastewater treatment

Контролируемые показатели сточных вод	Исходные концентрации в сточных водах	После 1-го этапа очистки (ЖМКС) [8, 11]	После 2-го этапа очистки (ОГП) [12]	Предельно допустимые концентрации ¹
pH	2,33 – 2,66	5,95 – 6,30	7,01 – 7,67	6,50 – 8,50
Медь (Cu)				
Степень очистки, %	–	97,50 – 99,99	99,99	–
Концентрация мг/л	78,10	0,10 – 1,90	< 0,0012	0,001
Цинк (Zn)				
Степень очистки, %	–	97,00 – 99,99	99,99	–
Концентрация мг/л	50,12	0,20 – 1,50	< 0,0016	0,01
Кадмий (Cd)				
Степень очистки, %	–	75,00 – 95,00	99,99	–
Концентрация мг/л	0,20	0,01 – 0,05	< 0,0015	0,005
Железо (Fe)				
Степень очистки, %	–	99,99	99,99	–
Концентрация мг/л	147,71	< 0,0073	< 0,0073	0,10
Магний (Mg)				
Степень очистки, %	–	–	–	–
Концентрация мг/л	322,57	849,50 – 950,00	931,00 – 1100,00	40,00

Примечание: ¹ Приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552 (ред. от 10.03.2020) «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения».

Полученный осадок также подвергается процедурам сушки и грануляции, результатом чего является создание гуминового мелиоранта (ГМ).

Очищенная вода аккумулируется в пруду-накопителе перед ее повторным использованием.

Очистные сооружения выполнены в виде земляных прудов-отстойников вместимостью 5000 – 15000 м³.

Проектная емкость каждого пруда рассчитывается исходя из трехсуточного объема сточных вод, что обеспечивает:

- необходимую продолжительность технологического цикла очистки;

- оптимальные условия для процессов осаждения и сорбции;
- стабильность работы системы при колебаниях расхода сточных вод.

Информация о параметрах очистки сточных вод после каждого этапа представлена в табл. 1 [8, 11, 12].

Для защиты от проникновения загрязняющих веществ в подземные воды и прилегающую территорию в основании прудов обустраивается сплошной противотрационный барьер, выполненный из полимерных листов (геомембран) типа 5/2, соответствующих нормам ГОСТ 10354-82 для пленки марки Вс и санитарным нормам (СанПиН 2.1.3684-21, пункт 4.23). Для защиты геомембраны от механических повреждений используются слои геотекстиля или полимерный лист.

На первом этапе, когда сточные воды обрабатываются ЖМКС, достигается практически полная (99,99%) очистка от меди, цинка и железа. Очистка от кадмия менее эффективна и составляет от 75 до 95%. Происходит также изменение кислотности воды: значение pH повышается с 2,33 – 2,66 до 5,95 – 6,30. При этом концентрация магния в воде значительно увеличивается – с 322,57 до 849,50 – 950,00 мг/л.

На втором этапе очистки, с использованием сорбента ОГП, удается достичь 99,99% очистки от меди, цинка, кадмия и железа, что обеспечивает соответствие концентрации этих металлов нормативным предельно допустимым концентрациям (ПДК). Однако концентрация магния продолжает увеличиваться и достигает значений 931,00 – 1100,00 мг/л.

Высокая, но неполная эффективность первого этапа по отношению к кадмию (75 – 95%) является технологическим обоснованием для необходимости второй, завершающей стадии. Тот факт, что после обработки ОГП достигается 99,99%

очистка по всем металлам, включая кадмий, демонстрирует принцип последовательной оптимизации процесса. Первый этап удаляет основную массу загрязнений, а второй – остаточные концентрации, что является экономически и технологически рациональным подходом.

Эксплуатация

Разработанная технология требует четкой организации ее практического применения. В данном разделе представлены принципы эксплуатации системы очистки, направленные на поддержание ее непрерывного цикла работы. Описывается схема функционирования дублирующих линий прудов, процедуры планового обслуживания и удаления осадков, что в совокупности обеспечивает устойчивость всего комплекса сооружений.

Процесс организован следующим образом:

- при накоплении критического объема осадка в активной линии происходит ее временное выведение из эксплуатации;
- механизированная очистка прудовой системы осуществляется специализированной техникой;
- извлеченные донные отложения направляются на перерабатывающую площадку или в зону временного хранения;
- пока первая линия находится в режиме регенерации, очистные операции переключаются на дублирующую линию прудов.

Ступенчатая система обеспечивает:

- последовательную физико-химическую очистку водных потоков;
- аккумуляцию очищенной воды в накопительных резервуарах.

Данная система представляет собой безотходный цикл.

Для оценки экономической эффективности предлагаемой технологии выполнен расчет первоначальных инвестиций, включающих:

– затраты на материалы:
 • подготовка ЖМКС и ОГП;
 – капитальные вложения в оборудование:

- аэрационные системы, насосное и сушильное оборудование,
- УФ-обеззараживающие установки,
- емкости для хранения очищенной воды,
- контрольно-измерительные приборы (расходомеры, pH-метры);
- строительно-монтажные работы:
- земляные работы (подготовка котлованов под пруды).

Стоимость оборудования определяется по рыночным ценам с учетом:

- транспортных расходов и монтажных и пуско-наладочных работ (15% от стоимости оборудования).

Данные по номенклатуре и стоимости основного технологического оборудования приведены в табл. 2.

Для циркуляции воды, предотвращения застоя и цветения используются четыре аэратора BF-370, стоящие 400 тыс. руб. Вода перекачивается насосной станцией с двумя насосами ЦНС-60-132 (производительностью 60 м³/ч) и двумя Rexa PRO VO80A-244 (производитель-

ностью 40 л/с), общая стоимость – 1,2 млн руб.

Земельные работы для строительства четырех прудов общим объемом 60 000 м³ включают оплату экскаватора (125 м³/ч). Зарплата машиниста – 432 тыс. руб., топливо – 672 тыс. руб. Амортизация экскаватора – 240 тыс. руб. Итого, без учета транспортировки, 1,344 млн руб. Транспортировка породы добавляет 403 тыс. руб. Для гидроизоляции используется геомембрана (16 746 м²) стоимостью 2,846 млн руб. Общие затраты на земляные работы, включая транспортировку и геомембрану, составляют 4,593 млн руб.

Для складирования материалов и организации хозяйственных помещений необходимы закрытые помещения и навес. Строительные работы – 20 м². Хранение очищенной воды для полива осуществляется в металлической емкости (30 м³). Для обеззараживания очищенной воды используется УФ-установка ОДВ-4С (5 м³/ч). Общая стоимость – 760 тыс. руб.

Для ускорения сушки материалов используется дробильно-сушильное оборудование QGS-5 (два комплекта) стои-

Таблица 2

Структура затрат на создание системы очистки сточных вод от металлических загрязнений

The cost structure of creating a wastewater treatment system for metal pollution

Оборудование	Кол-во, шт	Цена, млн руб. за ед.	Сумма, млн руб.	Расходы на логистику и монтаж, руб.	Всего капитальных затрат, млн руб.
Аэратор BF-370, шт.	4	0,025	0,1	0,015	0,115
Насосная станция	1	1,2	1,2	0,18	1,38
Строительные работы, м ²	20	0,008	0,16	0,024	0,184
Земельные работы, м ³	60 000	0,00007	4,593	0,689	5,282
Емкости для очищенной воды, шт.	1	0,5	0,5	0,075	0,575
УФ-установка, шт.	1	0,1	0,1	0,015	0,115
Сушильное оборудование, шт.	2	4,5	9,0	1,35	10,35
					18,00

мостью 9 млн руб. Расчет затрат на электроэнергию для сушки 32 000 кг материала показывает затраты в 2320 руб.

Транспортно-заготовительные затраты включают цену отходов (20 руб./т) и доставку (6 руб./т). Общая стоимость 1 т материала — 26 руб. Общие затраты на материалы в день ~827 — 832 руб.

Общая стоимость очистки 1591 м³ сточных вод составила 18 млн руб. Стоимость очистки 1 м³ сточных вод — 1,97 руб., с учетом материала и доставки, и 4,20 руб. — с учетом эксплуатационных затрат.

Экономическое обоснование предлагаемой технологии очистки требует оценки не только прямых капитальных и эксплуатационных затрат, но и величины экологического ущерба, предотвращаемого ее внедрением. Расчет предотвращенного ущерба позволяет количественно оценить экологический эффект и является частью определения совокупной экономической эффективности проекта.

Для определения размера ущерба, который был нанесен водным объектам из-за сброса в них загрязняющих веществ, используется специальная методика расчета. Она устанавливает правила и формулы для вычисления точной суммы компенсации за причиненный вред [Приказ Минприроды России от 13 апреля 2009 г. № 87 «Об утверждении Методики исчисления размера вреда, причиненного водным объектам вследствие нарушения водного законодательства»]. Согласно этой методике, ущерб от сброса металлов оценен в 12,55 млн руб. (медь, магний, цинк, железо, кадмий, никель, кобальт).

Вред от загрязнения почв отходами оценивается в денежном эквиваленте по установленной формуле [Об утверждении Методики исчисления размера вреда, причиненного почвам как объекту охраны окружающей среды (с из-

менениями на 18 ноября 2021 г.) Приказ Минприроды России (Министерства природных ресурсов и экологии РФ) от 08.07.2010 № 238 (пункт 9)]. Исследование выявило экономический ущерб от захламления почв отходами производства и потребления в размере 36 млн руб./год.

Оценка экономической выгоды от внедрения технологии. В расчетах экономической эффективности проекта применена ставка дисконтирования, определяемая как совокупность двух ключевых макроэкономических показателей: ключевой ставки Центрального банка РФ (21%) и уровня инфляции (8,54%). Суммарное значение ставки дисконтирования составляет 29,54% годовых.

Капитальные затраты на внедрение технологии — 18,00 млн руб. Предотвращенный вред водным объектам оценивается в 12,55 млн руб./год, а почвам — в 36,00 млн руб./год.

Годовой экономический эффект от внедрения проекта очистки сточных вод складывается из:

- экономии на экологических штрафах: 48,55 млн руб./год;
- текущих эксплуатационных затрат: 1,30 млн руб./год;
- чистого годового эффекта: 47,25 млн руб./год (48,55 — 1,30).

Для комплексной оценки эффективности с учетом фактора времени применяется метод дисконтирования денежных потоков по формуле

$$ДДП = ДП / (1 + Сд)^t, \quad (1)$$

где ДП — чистый денежный поток за расчетный год (в данном случае 47,25 млн руб.); Сд — ставка дисконтирования (29,54%, или 0,2954 в долях единицы); t — порядковый номер года, для которого рассчитывается дисконтированный поток.

Для оценки экономической эффективности проекта рассчитывается чи-

стый дисконтированный доход (ЧДД). Он определяется суммированием всех дисконтированных чистых годовых эффектов и вычитанием первоначальных инвестиций (табл. 3).

Формула расчета:

$$\text{ЧДД} = \sum [47,25 \text{ млн руб.} / (1 + 0,2954)^t] - 18,00 \text{ млн руб.} \quad (2)$$

В результате расчетов ЧДД составил 125,17 млн руб., что говорит об экономической выгоде проекта.

Внедрение безотходной технологии очистки сточных вод демонстрирует высокую экономическую эффективность.

Чистый дисконтированный доход от проекта составляет 125,17 млн руб. (143,17 – 18,01), что значительно превышает нулевую отметку.

Индекс доходности, демонстрирующий прибыльность каждого вложенного рубля, равен 6,95 (125,17/18,01).

Прогнозируемый период окупаемости инвестиционных вложений в проект составляет примерно 14 месяцев. Достижение экономического эффекта обеспечивается за счет реализации ряда технических и технологических решений, включая применение материалов с повышенной эффективностью, что приводит к значительному сокращению операционных расходов.

Дополнительным финансовым стимулом выступает минимизация экологических платежей и штрафных санкций, связанных с загрязнением водных ресурсов и почв, вследствие повышения качества очистки и снижения общего негативного воздействия на окружающую среду.

Рассуждения

Технология является примером современного подхода к решению экологических задач, который сочетает в себе не только эффективную очистку, но и принципы ресурсосбережения, что со-

Таблица 3

Дисконтированные денежные потоки проекта Discounted cash flows of the project

Год (t)	Чистый годовой эффект (Сд)	Дисконти- рующий множитель (1/1+Сд) ^t	Дисконтиру- ющий денеж- ный поток (ДДП)
1	47,25	0,76	35,91
2	47,25	0,59	27,87
3	47,25	0,45	21,26
4	47,25	0,34	16,06
5	47,25	0,26	12,28
6	47,25	0,20	9,45
7	47,25	0,15	7,08
8	47,25	0,12	5,67
9	47,25	0,09	4,25
10	47,25	0,07	3,30
Сумма	143,13		

ответствует концепции устойчивого развития горнотехнических систем.

Комплексность и синергия этапов

Двухстадийная схема очистки логически обоснована. Первый этап направлен на удаление основной массы загрязнений, в частности, токсичных катионов тяжелых металлов. Механизм заключается в их соосаждении в форме труднорастворимых гидроксидов и основных солей, образующихся вследствие повышения pH среды. Одновременно происходит структурирование мелкодисперсных частиц в более крупные хлопья, что облегчает их последующее отделение. Второй, сорбционный этап выполняет функцию доочистки. Гуминовые вещества, являющиеся природными сорбентами и хелатообразователями, эффективно связывают остаточные количества металлов (Cu, Cd, Zn) [14]. Таким образом, процессы не дублируют, а взаимно дополняют друг друга, обеспечивая высокую степень очистки.

Ресурсный потенциал и безотходность

Ключевым аспектом данной технологии является возможность трансформации отходов производств во вторичный ресурс. Получение из образующегося осадка мелиоранта ФММ решает проблему утилизации осадка. Магний и калий, концентрация которых увеличивается на разных этапах, являются ценными макроэлементами минерального питания растений [15, 16]. Таким образом, на завершающих этапах очистки получается доочищенная вода и мелиоранты.

Ключевой статьей экономии является экономия на экологических штрафах в размере 48,55 млн руб./год. Это не доход в прямом смысле, а избежание значительных регулярных платежей, которые предприятие было бы вынуждено исполнять в случае несоблюдения нормативов сброса загрязняющих веществ. Данная сумма является количественной оценкой потенциального экологического ущерба, который технология предотвращает ежегодно. Ее размер указывает на то, что до внедрения технологии либо объемы сбросов, либо их токсичность были существенными, что влекло за собой серьезные финансовые риски и репутационные издержки для предприятия.

Вторая составляющая расчета — текущие эксплуатационные затраты в 1,30 млн руб./год. Включение этой позиции важно для объективной оценки, так как любая очистная система требует расходов на электроэнергию, реагенты, техническое обслуживание, зарплату персонала и амортизацию оборудования. Сопоставление этой суммы с экономией на штрафах (48,55 млн руб./год) показывает исключительно высокую операционную эффективность проекта. Это свидетельствует о том, что выбрана не только экологически, но и экономически эффективная технология.

Заключение

Представленная технология является рациональной и экологически ориентированной. Она не только обеспечивает очистку сточных вод от тяжелых металлов, но и дает возможность использования образованных осадков и отработанных материалов в качестве мелиорантов, тем самым снижая экономические и экологические издержки всего процесса. Технологический процесс реализуется в четыре последовательные стадии:

– подготовительная стадия: накопление и усреднение сточных вод в аккумулярующей емкости, обеспечивающее стабильность последующих процессов очистки;

– основная очистка: обработка водной среды ЖМКС (дозировка 10 г/л, время контакта 120–180 мин), в результате которой достигается:

- эффективное осаждение тяжелых металлов (эффективность >90%),
- коррекция рН до нейтральных значений,

- насыщение раствора магнием,
- образование вторичного продукта — мелиоранта ФММ;

– доочистка: сорбционная обработка ОГП, обеспечивающая:

- удаление остаточных металлов до ПДК,

- дополнительную нормализацию рН,
- повышение содержания калия,
- получение мелиоранта ГМ;

– финальная стадия: накопление доочищенной воды в резервуаре для последующего технического использования.

Экономическая эффективность технологии подтверждается:

- низкими затратами очистки — 4,20 руб./м³;

- годовым экономическим эффектом 47,25 млн руб. (с учетом эксплуатационных затрат 1,30 млн руб.);

- предотвращением экологических платежей на 48,55 млн руб./год;
- возможностью получения мелиорантов (ФММ и ГМ).

Разработанная технология направлена на ввод в хозяйственный оборот промышленных отходов и предотвращение накопления вторичных отходов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вараева Е. А., Аксенов В. И. Водное хозяйство горно-обогатительных комбинатов: проблемы и пути решения // Вода Magazine. — 2016. — № 1(101). — С. 28–32.
2. Галкин Ю. А., Уласовец Е. А., Селицкий Г. А., Ермаков Д. В., Обадин Д. Н. Результаты разработки внедрения технологии очистки промышленных сточных вод предприятий горно-металлургического комплекса / Чистая вода России — 2021: Сборник материалов XVI Международного научно-практического симпозиума и выставки. — Екатеринбург: ООО «ДжиЛайм», 2021. — С. 261–263.
3. Abebe Y., Whitehead P., Alamirew T., Li Jin, Alemayehu E. Evaluating the effects of geochemical and anthropogenic factors on the concentration and treatability of heavy metals in Awash River and Lake Beseka, Ethiopia: arsenic and molybdenum issues // Environmental Monitoring and Assessment. 2023, vol. 195, article 1188. DOI: 10.1007/s10661-023-11674-z.
4. Barago N., Mastroianni C., Pavoni E., Floreani F., Parisi F., Lenaz D., Covelli S. Environmental impact of potentially toxic elements on soils, sediments, waters, and air nearby an abandoned Hg-rich fahlore mine (Mt. Avanza, Carnic Alps, NE Italy) // Environmental Science and Pollution Research. 2023, vol. 30, pp. 63754–63775. DOI: 10.1007/s11356-023-26629-7.
5. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2023 году: Доклад Минприроды России. — М., 2024. — 711 с.
6. Рыбникова Л. С., Рыбников П. А., Наволокина В. Ю. Реабилитация техногенных объектов, отработанных медноколчеданных месторождений на примере Левихинского рудника (средний Урал) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2023. — Т. 334. — № 8. — С. 137–150. DOI: 10.18799/24131830/2023/8/4089.
7. Рыбникова Л. С., Рыбников П. А., Наволокина В. Ю. Оценка эффективности очистки кислых шахтных вод (на примере медноколчеданных рудников Среднего Урала) // Записки Горного института. — 2024. — Т. 267. — С. 388–401.
8. Антонинова Н. Ю., Собенин А. В., Усманов А. И., Шепель К. В. Оценка возможности использования отходов железо-магниевого производства для очистки сточных вод от тяжелых металлов (Cd^{2+} , Zn^{2+} , Co^{2+} , Cu^{2+}) // Записки Горного института. — 2023. — Т. 260. — С. 257–265. DOI: 10.31897/PMI.2023.34.
9. Галкин Ю. А., Уласовец Е. А., Селицкий Г. А., Ермаков Д. В., Обадин Д. Н. Результаты разработки внедрения технологии очистки промышленных сточных вод предприятий горно-металлургического комплекса // Чистая вода России — 2021: Сборник материалов XVI Международного научно-практического симпозиума и выставки. — Екатеринбург: ООО «ДжиЛайм», 2021. — С. 261–263.
10. Селицкий Г. А. Технологическая схема очистки карьерных и подотвальных вод // Экология производства. — 2005. — № 9. — С. 83–87.
11. Собенин А. В., Антонинова Н. Ю., Усманов А. И., Шепель К. В. Удаление ионов меди из промышленных сточных вод с использованием отходов железо-магниевого производства // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2023. — № 2. — С. 32–42. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-2-32-42.
12. Антонинова Н. Ю., Собенин А. В., Усманов А. И., Горбунов А. А. Обоснование возможности применения отходов производства гуминовых препаратов для очистки сточных вод от металлов (Cd^{2+} , Zn^{2+} , Mg^{2+} , Cu^{2+}) с целью разработки эффективных мероприятий по экологической реабилитации // Записки Горного института. — 2024. — Т. 267. — С. 421–432.
13. Кузнецова Т. В., Иоффе Е. М., Сагалевиц Ю. Д. Патент № 2011638 С1 Российская Федерация, МПК С01F 5/06. Способ получения оксида магния из серпентинита: № 4860691/26: заявл. 08.06.1990: опубл. 30.04.1994.
14. Пузырева В. М., Демичева Ю. Л. Гуминовые вещества как природные сорбенты // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2010. — № 2. — С. 22–25.

15. Журова В. Г., Светличная М. С. Изучение влияния ионов калия, кальция и магния на рост и развитие растений // Достижения науки и образования. – 2018. – № 14(36). – С. 13–15.
16. Аканова Н. И., Козлова А. В., Мухина М. Т. Роль магния в системе питания растений // Агрехимический вестник. – 2021. – № 6. – С. 66–72. DOI: 10.24412/1029-2551-2021-6-014. **PLAS**

REFERENCES

1. Varava E. A., Aksenov V. I. Water management of mining and processing plants: problems and solutions. *Water Magazine*. 2016, no. 1(101), pp. 28–32. [In Russ].
2. Galkin Yu. A., Ulasovets E. A., Selitsky G. A., Ermakov D.V., Obadin D. N. The results of the development and implementation of industrial wastewater treatment technology for mining and metallurgical enterprises. *Chistaya voda Rossii – 2021: Sbornik materialov XVI Mezhdunarodnogo nauchno-prakticheskogo simpoziuma i vystavki* [Clean Water of Russia–2021: Proceedings of the XVI International Scientific and Practical Symposium and Exhibition], Ekaterinburg, 2021, pp. 261–263. [In Russ].
3. Abebe Y., Whitehead P., Alamirew T., Li Jin, Alemayehu E. Evaluating the effects of geochemical and anthropogenic factors on the concentration and treatability of heavy metals in Awash River and Lake Beseka, Ethiopia: arsenic and molybdenum issues. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2023, vol. 195, article 1188. DOI: 10.1007/s10661-023-11674-z.
4. Barago N., Mastroianni C., Pavoni E., Floreani F., Parisi F., Lenaz D., Covelli S. Environmental impact of potentially toxic elements on soils, sediments, waters, and air nearby an abandoned Hg-rich fahlore mine (Mt. Avanza, Carnic Alps, NE Italy). *Environmental Science and Pollution Research*. 2023, vol. 30, pp. 63754–63775. DOI: 10.1007/s11356-023-26629-7.
5. *O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchey sredy Rossiyskoy Federatsii v 2023 godu: Doklad Minprirody Rossii* [On the state and environmental protection of the Russian Federation in 2023: Report. Ministry of Natural Resources of Russia], Moscow, 2024, 711 p. [In Russ].
6. Rybnikova L. S., Rybnikov P. A., Navolokina V. Yu. Rehabilitation of man-made facilities, spent copper-crust deposits on the example of the Levikhinsky mine (Middle Urals). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2023, vol. 334, no. 8, pp. 137–150. [In Russ]. DOI: 10.18799/24131830/2023/8/4089.
7. Rybnikova L. S., Rybnikov P. A., Navolokina V. Yu. Assessment of the effectiveness of acid mine water purification (using the example of copper-mineralized mines in the Middle Urals). *Journal of Mining Institute*. 2024, vol. 267, pp. 388–401. [In Russ].
8. Antoninova N. Yu., Sobenin A. V., Usmanov A. I., Shepel K. V. Assessment of the possibility of using iron-magnesium production waste for wastewater treatment from heavy metals (Cd^{2+} , Zn^{2+} , Co^{2+} , Cu^{2+}). *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 260, pp. 257–265. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2023.34.
9. Galkin Yu. A., Ulasovets E. A., Selitsky G. A., Ermakov D. V., Obadin D. N. Results of the development and implementation of industrial wastewater treatment technology for mining and metallurgical enterprises. *Chistaya voda Rossii – 2021: Sbornik materialov XVI Mezhdunarodnogo nauchno-prakticheskogo simpoziuma i vystavki* [Clean Water of Russia–2021: Proceedings of the XVI International Scientific and Practical Symposium and Exhibition], Ekaterinburg, 2021, pp. 261–263. [In Russ].
10. Selitsky G. A. Technological scheme of purification of quarry and subsurface waters. *Ecology of production*. 2005, no. 9, pp. 83–87. [In Russ].
11. Sobenin A. V., Antoninova N. Y., Usmanov A. I., Shepel K. V. Removal of copper ions from industrial wastewater using ferromagnesium production waste. *Minerals and Mining Engineering*. 2023, no. 2, pp. 32–42. [In Russ]. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-2-32-42.
12. Antoninova N. Yu., Sobenin A. V., Usmanov A. I., Gorbunov A. A. Substantiation of the possibility of using waste from the production of humic preparations for wastewater treatment from metals (Cd^{2+} , Zn^{2+} , Mg^{2+} , Cu^{2+}) in order to develop effective measures for environmental rehabilitation. *Journal of Mining Institute*. 2024, vol. 267, pp. 421–432. [In Russ].
13. Kuznetsova T. V., Ioffe E. M., Sagalevich Yu. D. *Patent RU 2011638 C1, MPK C01F 5/06*, 30.04.1994. [In Russ].
14. Puzyreva V. M., Demicheva Yu. L. Guminovye substances as natural sorbents. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2010, no. 2, pp. 22–25. [In Russ].

15. Zhurova V. G., Svetlichnaya M. S. Study of the effect of potassium, calcium and magnesium ions on plant growth and development. *Dostizheniya nauki i obrazovaniya*. 2018, no. 14(36), pp. 13–15. [In Russ].

16. Akanova N. I., Kozlova A. V., Mukhina M. T. The role of magnesium in the plant nutrition system. *Agrochemical Herald*. 2021, no. 6, pp. 66–72. [In Russ]. DOI: 10.24412/1029-2551-2021-6-014.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Антонинова Наталья Юрьевна*¹ — канд. техн. наук,

зав. лабораторией, e-mail: natal78@list.ru,

ORCID ID: 0000-0002-8503-639X,

*Собенин Артем Вячеславович*¹ — научный сотрудник,

e-mail: arsob@yandex.ru,

ORCID ID: 0000-0001-5513-5680,

*Усманов Альберт Исмагилович*¹ — научный сотрудник,

e-mail: albert3179@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0002-3650-0467,

*Кузнецова Ярослава Артемовна*¹ — младший научный сотрудник,

e-mail: yaroslava.brusnitsyna@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0002-7808-8474,

¹ Институт горного дела Уральского отделения РАН.

Для контактов: Собенин А.В., e-mail: arsob@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*N. Yu. Antoninova*¹, Cand. Sci. (Eng.),

Head of Laboratory, e-mail: natal78@list.ru,

ORCID ID: 0000-0002-8503-639X,

*A. V. Sobenin*¹, Researcher,

e-mail: arsob@yandex.ru,

ORCID ID: 0000-0001-5513-5680,

*A. I. Usmanov*¹, Researcher,

e-mail: albert3179@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0002-3650-0467,

*Ya. A. Kuznetsova*¹, Junior Researcher,

e-mail: yaroslava.brusnitsyna@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0002-7808-8474,

¹ Ural State Mining University, 620144, Ekaterinburg, Russia.

Corresponding author: A. V. Sobenin, e-mail: arsob@yandex.ru.

Получена редакцией 24.07.2025; получена после рецензии 06.10.2025; принята к печати 10.11.2025.

Received by the editors 24.07.2025; received after the review 06.10.2025; accepted for printing 10.11.2025.

