

Геоэкология

DOI: 10.34828/UdSU.2024.45.77.003

УДК 621.187.12

Б.Б. Зобнин

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ОБЪЕКТА НАКОПЛЕННОГО ВРЕДА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ НА ПРИМЕРЕ ДЕГТЯРСКОГО МЕДНОГО РУДНИКА

Аннотация. Предлагается новая технология ликвидации объектов накопленного вреда окружающей среде (НВОС), заключающаяся в безреагентной очистке и нейтрализации кислых рудничных вод (КРВ), описываемая как конфликтно-управляемая система при интеллектуализации процессов наблюдения. Предложена техническая реализация, обеспечивающая высокую эксплуатационную надежность за счет применения кавитационного воздействия на КРВ. В конфликтно-управляемой системе роль союзника – играют воздействия, направленные на ликвидацию НВОС, а роль противника – негативные процессы, препятствующие достижению поставленной цели и являющиеся неопределёнными (гидрогеомеханические, геохимические и т.д.). Эффективность конкретной технологии ликвидации НВОС на нижнем иерархическом уровне характеризуется величиной удельных затрат на очистку 1 м³ шахтной воды и извлечения из нее металлосодержащего осадка. Обосновано использование онтологического подхода к компьютерному моделированию технологии преобразования свойств КРВ в свойства очищенной воды.

Ключевые слова: концептуальная модель, объекты накопленного вреда окружающей среде, среда моделирования, объекты накопленного вреда, природно-технологические комплексы, кислые рудничные воды, ионы тяжелых металлов, безреагентная очистка стока, гидротермодинамическая кавитация, конфликтно-управляемая система.

Для цитирования: Зобнин Б.Б. Концептуальная модель объекта накопленного вреда окружающей среде на примере Дегтярского медного рудника // Управление техносферой: электрон. журнал, 2024. Т.7. Вып.1. URL:<https://technosphere-ing.ru> С. 26–41. DOI: 10.34828/UdSU.2024.45.77.003.

Введение

Завершение отработки большого числа месторождений в последние годы привело к необходимости управления процессами, происходящими на

постэксплуатационном этапе функционирования этих месторождений, нарушенных многолетними горными работами. Одним из таких процессов является самоизлив шахтных вод. В 1998г создано Международное сообщество по профилактике кислотности (International Network for Acid Prevention, INAP) – это ассоциация ведущих горнодобывающих компаний (Anglo American, Barrick Gold Corporation, Rio Tinto и др.).

Целью деятельности INAP является значительные улучшения в области управления сульфидными рудными материалами при отработке и после ее завершения, сокращение последствий, связанных с кислотным дренажом, путем обобщения информации и опыта работ в области кислотного дренажа, обмена знаниями и исследованиями, разработкой технологий. Однако до сих пор не удавалось в промышленных масштабах решить задачу очистки кислых рудничных вод от тяжелых металлов и их нейтрализацию с использованием безреагентных методов. Возросший интерес к безреагентным методам обработки жидких сред объясняется тем, что эти методы очистки и дезинфекции не загрязняют природную среду химическими веществами, не оказывают вредного или раздражающего воздействия на организм человека.

Результаты исследования

Предлагается новая технология ликвидации объектов накопленного вреда окружающей среде (НВОС), заключающаяся в безреагентной очистке и нейтрализации кислых рудничных вод (КРВ), описываемая конфликтно-управляемой системой при интеллектуализации процессов наблюдения. Технология направлена на перевод металлов в ионной форме, содержащихся в кислых рудничных водах (КРВ), в нерастворимый осадок с использованием свободных радикалов в качестве окислителей. Традиционно используемое на станциях нейтрализации КРВ известковое молоко не обеспечивает необходимой

степени извлечения из сточных вод токсичных компонентов и связано с большими затратами.

Предлагаемая нами технология относится к классу продвинутой окислительных технологий (АОТ), которые представляют совокупность методов, позволяющих производить естественные окислители (в первую очередь гидроксильные радикалы) в объеме или на поверхности воды, участвующие в удалении примесей в процессах очистки и обеззараживания воды [1-3]. В развитие способа [1] нами предложена техническая реализация, обеспечивающая высокую эксплуатационную надежность за счет применения кавитационного воздействия на КРВ. В конфликтно-управляемой системе роль союзника играют воздействия, направленные на ликвидацию НВОС, а роль противника – негативные процессы, препятствующие достижению поставленной цели, и являющиеся неопределёнными (гидрогеомеханические, геохимические и т.д.). Эффекты непрогнозируемых воздействий, таких как перетоки шахтных вод из затопленных шахт в действующие по практически непроницаемым в естественных условиях и при эксплуатации породным толщам; самопроизвольное скоротечное распространение шахтных вод в недрах на значительные расстояния не удаётся прогнозировать с использованием известных литогидрогеомеханических моделей, так как они требуют использования дополнительной информации, в частности, гидрогеологических наблюдений за уровнями подземных вод [4].

Технология направлена на реализацию областной целевой программы «Переработка техногенных образований Свердловской области». Программа разработана в развитие соответствующей Федеральной целевой программы, утвержденной Постановлением Правительства РФ от 24 июня 1996 г. N 738 и в соответствии с Указом №1 «О мерах по организации переработки техногенных образований» от 09.01.96 г. Программа является практическим выражением

государственной стратегии устойчивого развития РФ, одобренной Указом Президента РФ от 01.04.96 N 440, и соответствует требованиям Закона РФ «О защите населения и территории от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера».

Руководящими документами при решении задачи ликвидации НВОС являются наилучшие доступные технологии НДТ (*Best Available Technologies*), создаваемые для содействия интересам российской промышленности техническим комитетом по стандартизации №113 в плане научно-методического и экспертно-аналитического сопровождения внедрения НДТ в базовых отраслях российской промышленности.

Исследования, выполненные Уральским государственным горным университетом (УГГУ) в течение длительного периода, показали специфику этого класса объектов НВОС, особенно на постэксплуатационном этапе жизненного цикла горных предприятий (таких объектов в РФ сотни), как с позиций процессов, происходящих в них, так и с позиций технологических и технических решений, направленных на ликвидацию этого класса объектов накопленного экологического вреда». УГГУ предлагает создать ТРГ «Рудники, находящиеся на мокрой консервации».

Конкретизируем постановку задачи ликвидации НВОС применительно к Дегтярскому медному руднику.

По гидрогеологическим данным дренажные воды Дегтярского рудника относятся к сульфатным магниево-кальциевожелезистым, кислым и ультракислым, солоноватым, с минерализацией 3-8 г/л и рН = 2,5-3,6. В южной части бывшего карьера действует постоянный излив КРВ Дегтярского рудника и подотвальных вод террикона шахты Капитальная-1. С востока в озеро впадает р. Исток, которая, смешиваясь с рудничными водами, образует общий сток с минерализацией воды 3,7-12,8 г/л и рН = 2,3-3,3. В западном направлении

техногенное загрязнение распространяется в приповерхностном слое почвенных вод, попадая обратно в р. Исток. Ниже по течению, в районе слияния рек Исток и Дегтярка расположена станция нейтрализации. Суммарный речной и рудничный сток нейтрализуется здесь известковым молочком, который повышает водородный показатель рН до 6,5-8,5. После нейтрализации сточные воды попадают в р. Ельчевка, далее в пруд-отстойник. Вода из Ельчевского пруда сбрасывается в Волчихинское водохранилище, являющееся главным источником питьевого водоснабжения г. Екатеринбурга. Закономерности формирования этого опасного гидрогеохимического явления до конца не раскрыты.

Таким образом, рудник на постэксплуатационном этапе является источником возмущающих воздействий, включающих в себя: тренд, обусловленный снижением содержания полезного компонента в воде; сезонные колебания расходов шахтной воды, содержания металлов в воде, и величины рН, а также колебания, обусловленные состоянием оборудования. Для предотвращения разладки системы контроля, происходящей в случайный момент времени, необходимо управлять качеством ее функционирования, формируя корректирующие мероприятия, что определяет выбор процессного подхода, соответствующего стандартам серии ISO 9000 (ГОСТ Р ИСО 9000). Согласно последним международным требованиям в области метрологии и стандартизации основной оценкой качества результата измерений рекомендуется считать его неопределенность [5]. Применительно к Дегтярскому медному руднику объектами накопленного вреда являются: пункты разлива кислых рудничных вод (КРВ): карьер шахты Колчеданная, отвалы шахт Капитальная 1 и 2, техногенные родники на территории водосбора р.р. Ельчевка – Исток и другие (все горные выработки после 1999 года затоплены); техногенные грунты вдоль русла р. Исток площадью 166 га и объемом 366 тыс

т; южная часть Ельчевского пруда-отстойника со шламами (общая площадь загрязненных грунтов – 1,66 км², масса более 10,5 млн т); паводковые воды, в связи с которыми большая часть КРВ поступает в Объект без нейтрализации.

Среднегодовая величина суммарного водопритока в шахты Дегтярска за период 1948-1988 гг. изменялась от 182 м³/ч до 424 м³/ч при среднемноголетнем значении за последние 10 лет 220 м³/ч.

Для ликвидации объекта накопленного вреда окружающей среде предлагается:

- осушить затопленный карьер ш. Колчеданная, понизив на 40м существующий уровень разлива 331,7м с использованием погружных насосов и с использованием или без использования водопонижающих скважин и дренажных сооружений (выбор способа водопонижения производится с использованием результатов геофизического исследования путей миграции трещинно-жильных вод Дегтярского медного рудника). Поскольку это самая низкая точка рельефа, то произойдет осушение всех поверхностных водоёмов, заполненных КРВ. При этом произойдёт уменьшение водопритока с существующих 220м³/ч до 180 м³/ч;

- заполнить осушенный карьер с использованием следующей технологии: на дно осушенного карьера укладывается геотекстильное полотно для гидроизоляции, на которое насыпается техногенный грунт, наиболее загрязненный токсичными металлами; нижний слой грунта после утрамбовки перекрывается текстильным полотном, на которое засыпается следующий слой техногенного грунта с меньшей степенью загрязнения и т.д. На верхний слой закладочного материала укладываются геоматы с вмонтированными травами. Каждый слой закладочного материала утрамбовывается во избежание последующей усадки грунта;

- гарантировать ликвидацию объекта накопленного вреда путём очистки потока КРВ, остающегося после понижения уровня шахтных вод

(осуществляется путём обработки в проектируемом нашим коллективом технологическом комплексе, установленном в месте сосредоточенного излива КРВ из озера ш. Колчеданная). Комбинированная обработка КРВ установкой ДЭВА-С.3, представляющей собой многоступенчатый кавитационный реактор (проведены стендовые испытания), и магнитной системой позволяют нейтрализовать КРВ и подготовить выделение осадка в отстойнике-флокуляторе;

- очистить техногенные грунты, образовавшиеся в результате экскаваторной выемки осадков, накопившихся в р. Исток, а также в результате излива паводковых вод. Выбор технологии обработки техногенных грунтов производится по составленной карте суммарных показателей загрязняющих веществ (ЗВ). Технология обработки техногенных грунтов предусматривает их выемку и последующее захоронение или обработку в гидроударном узле мокрого помола (ГУУМП) дезинтеграторного типа с минимальными энергозатратами, не превышающими 8...14 кВт·ч/т. ГУУМП внедрён более, чем в 10 странах;

- обработать иловый осадок Ельчевского пруда (около 7 млн м³ шлама). Иловая (шламовая) часть пруда-отстойника отсекается, надшламовая вода перекачивается в осветленную часть пруда-отстойника. Шламовая часть делится на секции, последовательно высушивается. Шлам брикетируется для отправки в качестве флюса на медеплавильные заводы для выплавки меди;

- предусмотреть мониторинг геофизическими методами гидрогеологической обстановки Дегтярского медного рудника;

- ликвидировать станцию нейтрализации КРВ.

Обозначим общую задачу проектирования сооружений технологического комплекса через Zn. Эта задача включает в себя множество особенно значимых локальных задач: формирование структур технологических схем

обезвреживания жидких отходов производственно-технической системы (ПТС); расчет аппаратного оформления этих схем; размещение сооружений очистки сточных вод на генплане, оценку экологического воздействия ПТС на окружающую среду и др. [6]. Комплексное решение этих задач, направленное на получение решения задачи Z_n , требует создания сложной иерархической системы проектирования оборудования промышленной экологии, в которую, кроме перечисленных задач, входят задачи межуровневой координации и задачи, обеспечивающие получение решения в приемлемые сроки (рис. 1) [7]. Эффективность конкретной технологии ликвидации НВОС на нижнем иерархическом уровне характеризуется величиной удельных затрат на очистку 1 м³ шахтной воды и извлечения из нее металлосодержащего осадка, которые рассчитываются по формуле [8]:

$$S(x) = \sum_{r \in R} S_r(x_r) + \sum_{r \in R} \sum_{\omega \in \Omega} pr^\omega S_r^\omega(x_r, y_r^\omega)$$

где pr^ω – вероятность исхода ω ;

$y^\omega = x^\omega - x$ – отклонения фактического режима от расчетного режима;

$S_r(x_r)$ – расчетные затраты в r -м элементе системы.

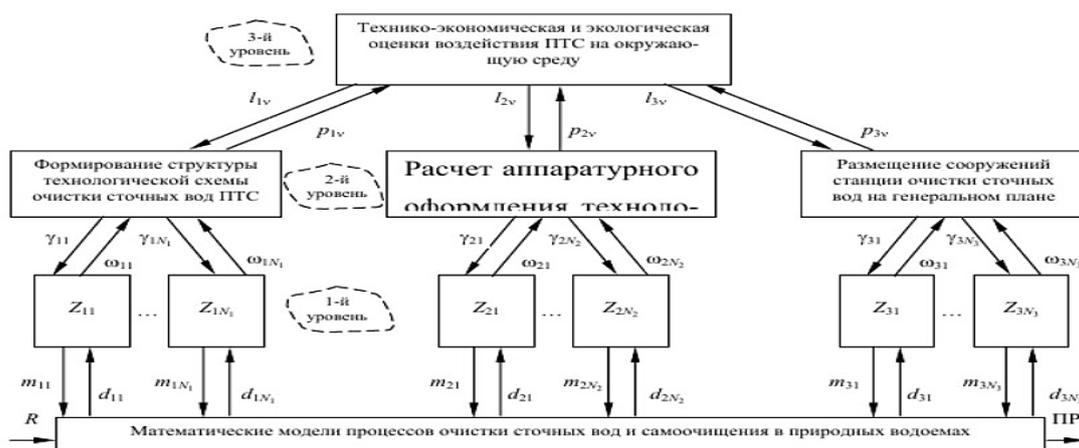


Рис.1. Иерархическая структура автоматизированного решения комплекса задач синтеза сооружений ТК

Развиваемый нами вероятностный подход корреспондируется с подходом, основанном на вероятностном анализе безопасности (probabilistic safety assessment, PSA), принятом в настоящее время Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ). Первое слагаемое в выражении (1) описывает приведенные затраты на очистку шахтной воды, определяемые структурой мобильного комплекса и типами используемого оборудования. Общие затраты в каждом элементе системы включают в себя затраты на приобретение оборудования и эксплуатационные затраты. Увеличение первого слагаемого определяется, в частности, ростом тарифов на энергоносители. Второе слагаемое в выражении (1) описывает изменения затрат в i -м элементе, вызванные отказами системы в процессе эксплуатации. Это слагаемое увеличивается при неадекватной реакции системы управления на изменение расходов шахтной воды и концентраций извлекаемых компонентов в воде.

Минимизация первого слагаемого достигается путём снижения: удельных капитальных затрат на очистку воды, руб./м³; удельной установленной мощности, кВт·ч/м³; удельного ресурсо- и энергопотребления, г/м³ (реагенты) и кВт·ч/м³ (энергопотребление); удельной себестоимости очищенной воды, руб./м³; удельных эксплуатационных затрат, руб./м³.

Основой выбора технологии ликвидации объекта накопленного вреда является математическое моделирование, позволяющее 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 [9]. Моделирование позволяет выявить возможные изменения физических, химических и биологических состояний окружающей среды, вызванные деятельностью ПТС [10].

Для проектирования технологического комплекса (ТК) очистки и нейтрализации КРВ, откачиваемых из шахт, находящихся на «мокрой» консервации, необходимо создать среду моделирования, отвечающую ключевым требованиям к ней на основе международного стандарта IEEE 1516-2010. архитектура распределенного имитационного моделирования *High Level Architecture (HLA)*, которая официально была формализована в рамках системы *C4ISR (command, control, communications, computers, intelligence, surveillance, and reconnaissance)* [11]. Сама моделируемая система меняет в процессе моделирования не только содержание информационных потоков, но и свою структуру: наряду с функционированием модулей-объектов системы идут процессы их развёртывания, подключения и свёртывания; системы могут иметь управляющий центр и центральный сервер, а могут и не иметь таковых. Часть объектов могут представляться интерфейсами к реальным устройствам, к датчикам обстановки и параметров среды, а также для взаимодействия с субъектами, а часть (или все) – чисто-программными моделями; оперативная обстановка может определяться как заданными сценариями, так и реальной картиной в динамике; поэтому системная интеграция осуществляется единым программным обеспечением, используемым как для *Modeling & Simulation (M&S)*, так и для реального взаимодействия подсистем и систем. При описании HLA введены следующие понятия: федерат – отдельно взятый модуль модельного эксперимента, обычно реализующий уникальную математическую модель, который реализуется в рамках объектной модели федерата *SOM (Simulation Object Model)*; федерация – совокупность федератов в едином информационном пространстве, которая реализуется в рамках объектной модели федерации *FOM (Federation Object Model)*.

Необходимо создание модели, языка, способов и алгоритмов интеграции геоинформационной системы в среду концептуального моделирования

природно-технических комплексов для поддержки всех этапов моделирования, обеспечения визуализации исходных данных и результатов расчетов, а также реализации запросов в ходе совместной расчетно-логической обработки графических характеристик компонентов объекта с учетом пространственных зависимостей.

Предлагается использовать онтологический подход к компьютерному моделированию технологии преобразования свойств КРВ в свойства очищенной воды [12]. При этом обеспечивается единое стандартизированное представление данных для всех приложений. Такое представление позволяет точно извлекать необходимую информацию и без проблем осуществлять ее интеграцию.

Для создания концептуальной модели, которая в дальнейшем трансформируется в трехмерную сетку (3D Grid), автоматически формируя значения в каждой ячейке, наиболее удобным является метод, предложенный в работе [13]. Для его реализации необходимо создание единого информационно-картографического пространства объекта исследования, которое и будет представлять собой концептуальную модель. Эта модель является современной электронной картой, на которой помимо визуализированной информации хранится и дополнительная - атрибутивная. Именно наличие этой составляющей позволяет в полуавтоматическом режиме формировать пространственную изменчивость гидродинамических параметров в 3D сетке. Современные геоинформационные системы обладают всеми вышеуказанными свойствами. Их использование позволяет не только сформировать концептуальную модель, но и подготовить кондиционный картографический материал, отвечающий требованиям современной картографии. Авторы используют данный метод для решения задач миграции загрязняющих веществ в подземных водах.

Для описания прогнозируемого и непрогнозируемого воздействия комплекса мероприятий на окружающую среду используется нейросетевая

модель [14]. Использование чат-бота ChatGPT позволяет создать внутри нейросети базу знаний из собственного контента.

Заключение

При использовании онтологического подхода к компьютерному моделированию технологии преобразования свойств КРВ в свойства очищенной воды обеспечивается единое стандартизированное представление данных для всех приложений. Такое представление позволяет точно извлекать необходимую информацию и без проблем осуществлять ее интеграцию, поскольку бизнес-процессы и различные источники данных должны быть связаны друг с другом с помощью общей метамоделю. Созданная концептуальная модель является основой имитации динамики потоков дренажных вод и прогнозирования влияния стратегий управления на водные ресурсы с использованием стека технологий: Modflow, Tensorflow, FloPy и с использованием методов: Multilayer Perceptron Neural Network (MLP-NN) и численного моделирования при помощи Modflow, response matrix.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Способ очистки кислых рудничных вод и мобильный технологический комплекс для его реализации: патент 2739259 Российская федерация СПК C02F1/48, B01D17/06 / Зобнин Б.Б., Кочетков В.В., Вожегов А.В., Семячков А.И., Пономарев О.А., Матевосян М.Б; заявл. 15.04.2020, опублик. 22.12. 2020. Бюл. № 36. 17 с.
2. 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.
3. Зобнин, Б.Б. Интеллектуализация процессов наблюдения // Изв. вузов. Горный журнал, 2002. №2. С.3–11.

4. Мохов А. В. О трансформации напряженно-деформированного состояния горного массива под влиянием затопления каменноугольных шахт // Наукові праці УкрНДМІ НАН України. 2013. № 13 (частина I). С. 147–153.
5. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement: First Edition, ISO, Switzerland, 1993, pp. 101.
6. Zobnin B.B., Kochetkov V.V., Shokurov D.S., Korolev O.A. Risk Management of Implementation of Reagentless Treatment of Acid Mine Water, International Journal of Materials Science and Applications, 2022, vol. 11, issue 1, pp 21–28].
7. Немтинов, В. А. Информационный анализ и моделирование объектов природно-промышленной системы. М.: «Издательство Машиностроение-1», 2005 112 с.
8. Зобнин, Б.Б., Кочетков В.В. Концепция проектирования мобильного комплекса очистки кислых рудничных вод и извлечения из них тяжелых металлов // Перспективы развития металлургии и машиностроения, НИОКР-2020, Екатеринбург, 2020
9. Зобнин Б.Б. Моделирование и управление социально-экономическими процессами // Депрессивные территории: оценка и механизм выхода из кризиса. Екатеринбург: Институт экономики УрО РАН, 2000, с. 210–228.
10. Охрана окружающей среды. Модели управления чистотой природной среды / под ред. К. Г. Гофмана и А. А. Гусева. М.: Экономика, 1977. 231 с.
11. Беляев С.А., Матросов В.В. Опыт создания среды имитационного моделирования // I-methods. 2018. Т. 10. № 3. С. 14–22
12. Zobnin B.B., Gorbenko O.A., Sorokin C.A. Designing an Ontology to Convert Factory Dust into Nanocomposites/ B.B. Zobnin, Refractories and Industrial Ceramics, 2015, vol. 56, issue 1, pp. 1 –10.
13. Картосемиотическая геоинформационная модель как основа для создания гидродинамической модели/А.В. Коноплёв, П.А. Красильников,С.А. Красильникова,О.В. Клёцкина // Научный журнал КубГАУ. 2012, №84(10). URL: <http://ej.kubagro.ru/2012/10/pdf/12.pdf> (Дата обращения:
14. Варнухов А.Ю., Зобнин Б.Б. Метод построения модели технологического процесса на основе ориентированного графа операций с применением генетического алгоритма // Цифровая экономика. 2023. №3(23). С.82 – 88.

Поступила в редакцию 28.11.2023

Сведения об авторе*Зобнин Борис Борисович*профессор, д.т.н., ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»,
620144 г. Екатеринбург, Куйбышева 30, Россия.

E-mail: zobninbb@mail.ru

B.B. Zobnin**CONCEPTUAL MODEL OF THE ACCUMULATED ENVIRONMENTAL DAMAGE OBJECT ON THE EXAMPLE OF DEGTYARSK COPPER MINE**

Annotation. A new technology of liquidation of objects of accumulated environmental damage (AED), consisting in reagentless treatment and neutralization of acid mine water (AMW), described as a conflict-controlled system under intellectualization of observation processes, is proposed. The technical realization providing high operational reliability due to the application of cavitation influence on AMW is proposed. In the conflict-controlled system the role of an ally is played by the impacts aimed at the elimination of AED, and the role of an adversary - negative processes that prevent the achievement of the goal and are uncertain (hydrogeomechanical, geochemical, etc.). Efficiency of a particular technology of liquidation of AED at the lower hierarchical level is characterized by the value of specific costs for treatment of 1 m³ of mine water and extraction of metal-containing sludge from it. The use of ontological approach to computer modeling of technology of transformation of AMW properties into properties of treated water is substantiated.

Keywords: conceptual model, objects of accumulated environmental damage, modeling environment, objects of accumulated damage, natural-technological complexes, acid mine water, heavy metal ions, reagentless runoff treatment, hydrothermodynamic cavitation, conflict-controlled system.

For citation: Zobnin B.B. [Conceptual model of the accumulated environmental damage object on the example of degtyarsk copper mine] *Upravlenie tekhnosferoi*, 2024, vol. 7, issue 1. (In Russ.) Available at: <https://technosphere-ing.ru/> pp. 27–41. DOI: 10.34828/UdSU.2024.45.77.003.

REFERENCES

1. *Sposob ochistki kislykh rudnichnykh vod i mobil'nyi tekhnologicheskii kompleks dlya ego realizatsii* [The method for purifying acidic mine waters and a mobile technological complex for its implementation]: patent 2739259 Russian Federation SEC C02F1/48, B01D17/06 / Zobnin

- B.B., Kochetkov V.V., Vozhegov A.V., Semyachkov A.I., Ponomarev O.A., Matevosyan M.B.; application 04/15/2020, publ. 22.12.2020. Byul. No. 36, 17 p. (In Russ.).
2. Zobnin B.B., Morina S.I. Ob odnoi zadache upravleniya s ogranicheniem na chislo pereklyuchenii [On one control problem with a limit on the number of switches]. *Izvestiya akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya* [Proceedings of the Academy of Sciences. Theory and control systems]. 2000, no.2, pp.72 – 77. (In Russ.).
 3. Zobnin, B.B. Intellectualizatsiya protsessov nablyudeniya [Intellectualization of observation processes] *Izv. vuzov. Gornyi zhurnal*, 2002, no.2, pp.3–11. (In Russ.).
 4. Mokhov A.V. O transformatsii napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya gornogo massiva pod vliyaniem zatopeniya kamennougol'nykh shakht [On the transformation of the stress-strain state of a mountain range under the influence of flooding of coal mines] *Naukovi pratsi UkrNDMI NAN Ukraini*. 2013, no. 13 (chastain I), pp. 147–153. (In Russ.).
 5. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement: First Edition, ISO, Switzerland, 1993, pp. 101.
 6. Zobnin B.B., Kochetkov V.V., Shokurov D.S., Korolev O.A. Risk Management of Implementation of Reagentless Treatment of Acid Mine Water, *International Journal of Materials Science and Applications*, 2022, vol. 11, issue 1, pp 21–28.
 7. Nemtinov, V. A. Informatsionnyi analiz i modelirovanie ob"ektov prirodno-promyshlennoi sistemy. [Information analysis and modeling of objects of the natural-industrial system]. Moscow: «Mashinostroenie-1. Publ.», 2005, 112 p. (In Russ.).
 8. Zobnin B.B., Kochetkov V.V. Kontseptsiya proektirovaniya mobil'nogo kompleksa ochistki kislykh rudnichnykh vod i izvlecheniya iz nikh tyazhelykh metallov [The concept of designing a mobile complex for acid mine water purification and extraction of heavy metals from them]. *Perspektivy razvitiya metallurgii i mashinostroeniya* [Prospects for the development of metallurgy and mechanical engineering, R&D 2020], Yekaterinburg, 2020. (In Russ.).
 9. Zobnin B.B. Modelirovanie i upravlenie sotsial'no-ekonomicheskimi protsessami [Modeling and management of socio-economic processes]. *Depressivnye territorii: otsenka i mekhanizm vykhoda iz krizisa* [Depressed territories: assessment and mechanism of recovery from the crisis]. Ekaterinburg: Institut ekonomiki UrO RAN, 2000, pp. 210–228. (In Russ.).

10. Okhrana okruzhayushchei sredy. Modeli upravleniya chistotoi prirodnoi sredy [Environmental protection. Models of environmental cleanliness management]. In K.G. Gofmana, A.A. Guseva. (ed). Moscow: Ekonomika, 1977, 231 p. (In Russ.).
11. Belyaev S.A., Matrosov V.V. Opyt sozdaniya sredy imitatsionnogo modelirovaniya [The experience of creating a simulation environment]. *I-methods*, 2018, vol. 10, no. 3, pp. 14–22. (In Russ.).
12. Zobnin B.B., Gorbenko O.A., Sorokin S.A. Designing an Ontology to Convert Factory Dust into Nanocomposites/ B.B. Zobnin, *Refractories and Industrial Ceramics*, 2015, vol. 56, issue 1, pp. 1–10. (In Russ.).
13. Konoplev A.V., Krasil'nikov P.A., Krasil'nikova S.A., Kletskina O.V. Kartosemioticheskaya geoinformatsionnaya model' kak osnova dlya sozdaniya gidrodinamicheskoi modeli [Cartosemiotic geoinformation model as a basis for creating a hydrodynamic model]. *Nauchnyi zhurnal KubGAU* [Scientific journal KubGAU]. 2012, no. 84(10). Available at: <http://ej.kubagro.ru/2012/10/pdf/12.pdf> (Accessed: (In Russ.).
14. Varnukhov A.Yu., Zobnin B.B. Metod postroeniya modeli tekhnologicheskogo protsessa na osnove orientirovannogo grafa operatsii s primeneniem geneticheskogo algoritma [Method of constructing a technological process model based on an oriented graph of operations using a genetic algorithm]. *Tsifrovaya ekonomika* [Digital Economy]. 2023, no.3(23), pp. 82 – 88. (In Russ.).

Received 28.11.2023

About the Author

Zobnin Boris Borisovich

Professor, Doctor of Technical Sciences, Ural State Mining University,

620144 Yekaterinburg, Kuibyshev 30, Russia.

E-mail: zobninbb@mail.ru