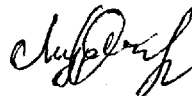


На правах рукописи



**МУРАШОВА ОЛЕСЯ НИКОЛАЕВНА**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА  
ЭКОХИМИЧЕСКОГО ОБЕЗВРЕЖИВАНИЯ ЦИАНИДА В РУДНОМ  
ШТАБЕЛЕ ПОСЛЕ КУЧНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ЗОЛОТА**

Специальность 25.00.36 - «Геоэкология»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Иркутск – 2006

Работа выполнена на кафедре технологии и предпринимательства  
Иркутского государственного педагогического университета

Научный руководитель: доктор технических наук,  
профессор, академик  
Чикин А. Ю.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Тимофеева С. С.  
кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник  
Ржечицкий Э.П.

Ведущая организация: Институт Геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН,  
г. Иркутск.

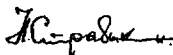
Защита диссертации состоится 25 октября 2006 г. в 10<sup>00</sup> на заседании  
диссертационного совета Д 212.073.04 Иркутского государственного  
технического университета по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Иркутского  
государственного технического университета.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью  
организации, просим направлять по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова,  
83, ИрГТУ, ученому секретарю диссертационного Совета.

Автореферат разослан 18 сентября 2006 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
диссертационного Совета  
докт. тех. наук, профессор



Н.Н.Страбыкин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

В связи с истощением запасов золотых россыпей и богатых золотосодержащих руд все чаще в качестве стратегического направления развития выбирают разработку месторождений бедных и забалансовых руд, маломощных месторождений относительно богатых руд, отходов горно-обогатительного производства и предприятий цветной металлургии. Для переработки таких руд, как правило, используют метод кучного выщелачивания (КВ).

В кучном выщелачивании в качестве растворителя благородных металлов используется цианид натрия, относящийся к категории сильнодействующих ядовитых веществ. Образующиеся отходы наряду с цианидом содержат цианидные комплексы металлов и тиоцианаты, подлежащие обезвреживанию перед консервацией отработанных рудных штабелей. Исследования в области детоксикации рудных штабелей направлены на удешевление технологии обезвреживания, сокращение вторичного загрязнения отходов, обеспечение одновременной очистки от нескольких загрязнителей, оптимизации отдельных стадий широко используемых технологий и т.д.

Из накопленного отечественного и мирового опыта известно о способности цианидов разрушаться под действием различных природных факторов, например, под действием кислорода, ультрафиолетового облучения, гидролиза, поглощения цианидов бактериями. Следовательно, существует возможность осуществления процесса обезвреживания рудного штабеля только за счет действия естественных природных факторов. Реализация метода экокхимической очистки отработанных рудных штабелей экономически и экологически очень заманчива из-за приемлемо низкой стоимости и соответствия современным экологическим нормативам.

Математическое моделирование – перспективный, научно обоснованный метод прогноза переноса воды и веществ. Он широко используется в почвоведении и экологии при прогнозе и учете отдаленных последствий

распространения различных веществ, в том числе и токсичных, в грунтах и подземных водах. Благодаря успехам вычислительной техники, стало возможным вместо натуральных проводить вычислительные эксперименты. Они существенно удешевляют и ускоряют процесс проектирования, позволяют проверить и спрогнозировать, как будет вести себя исследуемый объект в ситуациях, которые трудно или дорого организовать в натуральных условиях.

Целью диссертационной работы является разработка математического аппарата, позволяющего с достаточной точностью и на любой период прогнозировать экохимическое обезвреживание цианида в отработанном рудном штабеле под действием природных факторов.

Для реализации этой цели решались следующие задачи:

1. Теоретическое исследование экохимических процессов, протекающих в период постэксплуатации рудного штабеля.
2. Разработка математической модели, описывающей закономерности естественной деградации токсичных соединений в отработанном рудном материале.
3. Разработка программного комплекса, упрощающего процесс проектирования технологии обезвреживания цианидсодержащих отходов кучного выщелачивания под действием природных факторов.
4. Экспериментальная проверка достоверности предлагаемой математической модели, описывающей процесс естественного обезвреживания цианидсодержащих отходов кучного выщелачивания золота.

Методы исследования: В работе использованы методы физико-математического моделирования процессов фильтрации, диффузии и сорбции в грунтах, численные методы, методы математического моделирования на ЭВМ, методы математической статистики для обработки результатов постэксплуатации куч и моделирования.

**Научная новизна:**

1. Впервые предложена дифференциальная математическая модель деградации цианидсодержащих отходов, которая позволяет анализировать вклад различных естественных факторов и оценить с достаточной точностью продолжительность деструкции токсичных соединений в отработанном рудном штабеле.
2. Впервые показана функциональная зависимость экохимического обезвреживания цианидов от климатических характеристик местности.
3. Выявлена функциональная зависимость коэффициента восстанавливающей способности грунта от температуры и глубины штабеля, позволяющая с достаточной точностью описать вклад химических процессов в естественное обезвреживание отработанных рудных штабелей.

**Практическая значимость и реализация результатов**

Разработанный программный комплекс, имитирующий процесс естественного обезвреживания цианидсодержащих отходов, был апробирован при проведении опытно-промышленных испытаний на отработанных рудных штабелях месторождений «Лопуховское» и «Самозавское» (Республика Саха, Якутия). На основании выполненных исследований доказана возможность эффективного применения математического моделирования для прогноза характера и скорости протекания экохимической деструкции цианида в рудном штабеле. Применение естественного обезвреживания цианидсодержащего рудного штабеля месторождения «Лопуховское» позволило полностью исключить использование в качестве обезвреживающего реагента - гипохлорит кальция, что принесло экономический эффект в размере 1179,1 тыс. руб.

Разработанная технология принята к внедрению в проекте консервации рудного штабеля кучного выщелачивания месторождения "Самозавское", ожидаемый экономический эффект - 6224,1 тыс. руб.

Программный комплекс также может быть применен для оптимизации уже действующих схем постэксплуатационной детоксикации рудных штабелей.

Прикладные исследования, проводимые с помощью программного комплекса, не требуют дополнительных лабораторных экспериментов и промышленных испытаний. Исходными данными для программного обеспечения являются результаты инженерно-геологических и проектных изысканий.

**Научные положения, представляемые к защите:**

1. Математическая модель экохимического обезвреживания цианидов в рудном штабеле после применения технологии кучного выщелачивания золота, позволяющая анализировать вклад различных естественных факторов и оценить продолжительность деструкции токсичных соединений.
2. Алгоритмы для решения разработанной математической модели и программное обеспечение для имитации экохимической детоксикации цианидов в отработанном рудном штабеле.
3. Продолжительность периода детоксикации рудного штабеля под действием природных факторов возможно оптимизировать и регулировать за счет правильного выбора сроков начала обезвреживания и своевременной импульсной промывки.
4. Моделирование процесса естественной детоксикации цианидсодержащих рудных штабелей необходимо осуществлять в функциональной связи с климатическими характеристиками местности.

**Достоверность результатов** проведенных исследований, обоснованность научных положений и выводов, сформулированных в работе, подтверждаются:

- всесторонне проведенным анализом и обобщением предшествующих научных исследований;
- объемом опытно-производственных данных;
- сходимостью расчетных результатов с данными постэксплуатации куч на нескольких месторождениях (эффективность расчета составляет 0,816).

**Апробация работы.** Основные материалы диссертации были представлены на международных совещаниях «Экологические проблемы и новые технологии комплексной переработки минерального сырья»

(Плаксинские чтения, Чита, 2002) и «Современные проблемы комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья» (Плаксинские чтения, Санкт-Петербург, 2005); III Всероссийской конференции с международным участием «Актуальные вопросы защиты окружающей среды и безопасность территорий регионов России» (Улан-Удэ, 2006); ежегодных научно-практических конференциях «Технологическое образование» (ИГПУ, 2002 – 2005).

**Публикации.** По результатам выполненных исследований опубликованы 9 работ.

**Общая структура диссертации.** Диссертация изложена на 204 страницах и состоит из введения, четырех глав, заключения, 166 библиографических источников, 22 таблиц, 26 рисунков и 3 приложений.

Автор выражает признательность своему научному руководителю, проф. Чикину А.Ю. за своевременные и исчерпывающие консультации по научным и практическим вопросам, коллективу лаборатории «Охрана окружающей среды» ОАО «Иргиредмет» в лице заведующего лабораторией к.т.н. Петрова В.Ф., ведущего инженера Мурашова Н.М. и к.т.н. Петрова С.В. за помощь в решении технологических вопросов и подготовке диссертации к защите.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

В введении обоснована актуальность темы диссертации, раскрыты ее структура и основное содержание, представлены основные положения, выносимые на защиту.

Первый раздел посвящен изучению основных процессов, протекающих во время экхимической дегградации цианидов в отходах горнодобывающих предприятий и влияющих на них ключевых факторов. В разделе анализируются результаты исследований, моделирования и возможность применения к российским объектам технологии естественного обезвреживания.

Во втором разделе разработана дифференциальная модель естественного обезвреживания цианидов в рудном штабеле после кучного выщелачивания золота.

Третий раздел посвящен получению численного решения разработанной математической модели экохимической детоксикации цианидов в рудном штабеле и разработке программного комплекса, позволяющего определить концентрационные поля и линии концентрации цианида в рудном штабеле в любой момент времени и с любыми миграционными параметрами на основании данных, описывающих климатические особенности местности.

В четвертом разделе приведены результаты исследований по проверке достоверности математического описания процесс естественного обезвреживания цианидсодержащих отходов кучного выщелачивания золота на примере месторождений «Лопуховское» и «Самолазовское».

Основные результаты исследований отражены в следующих научных положениях:

**1. Математическая модель экохимического обезвреживания цианидов в рудном штабеле после применения технологии кучного выщелачивания золота, позволяющая анализировать вклад различных естественных факторов и оценить продолжительность деструкции токсичных соединений**

Объект моделирования — цианидсодержащий рудный штабель (куча) — крупномасштабная инерционная система, подверженная извне длительным воздействиям температуры, осадков, испарения. Влияние климатических особенностей снижается с глубиной горизонта рудного штабеля. В нижней части кучи наблюдается постоянная температура, влажность и дефицит кислорода. Это обуславливается не только глубиной, но и специфическими свойствами руды, например, большим содержанием глинистой и сульфидной фракций, а также применяемой технологией рудоподготовки. Внутри рудного штабеля под действием природных факторов протекают многочисленные

химические реакции, позволяющие цианиду самопроизвольно разлагаться. Анализ исследований в рассматриваемой области позволил выделить основные процессы, протекающие при экохимической детоксикации цианидсодержащих отходов, и влияющие на них ключевые факторы (табл. 1).

Таблица 1

Основные процессы, протекающие в отработанном рудном штабеле во время естественного обезвреживания цианида, и ключевые факторы, влияющие на них

Процесс	Факторы					
	Кол-во осадков	Влажность	Температура	pH	Кислотность	Минер. состав
Промывка осадками	+	+	+			
Испарение	+	+	+	+		
Сорбция / осаждение			+			+
Биодеградация		+	+		+	
Окисление					+	+
Образование тиоцианатов						+

Математическое моделирование процесса экохимической детоксикации цианидсодержащих отходов должно удовлетворять следующим условиям:

1. Базироваться на достаточно простых и фундаментальных положениях, характеризующих перенос веществ в грунтах и процесс экохимической деградации цианидов.
2. Содержать как можно меньше трудноопределяемых показателей, чтобы не ограничивать применение математической модели на практике.
3. Быть универсальной, т.е. единой для различных установок кучного выщелачивания золота.

Математический аппарат (1-4), позволяющий описать процесс экокхимической детоксикации цианидсодержащего отработанного штабеля, содержит:

- модель экокхимической деградации цианидов в рудном штабеле. Для математического описания переноса цианида в рудном штабеле используется фундаментальное конвективно-дисперсионное уравнение, дополненное уравнением, описывающим реакцию разложения цианида первого порядка.

- модель влажностного режима рудного штабеля. В основу модели влагопереноса положено дифференциальное уравнение Ричардса, описывающее вертикальный одномерный перенос влаги.

- модель температурного режима рудного штабеля. Процессы теплопроводности описываются дифференциальными уравнениями Фурье и осложнены сезонным промерзанием и оттаиванием:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \theta C(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \cdot \frac{\partial C(x, \tau)}{\partial x} - q C(x, \tau) \right) - k_f C(x, \tau) \\ \frac{\partial \theta(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_w(\theta) \frac{\partial H(x, \tau)}{\partial x} \right) \\ \frac{\partial t_T(x, \tau)}{\partial \tau} = a_T \frac{\partial^2 t_T(x, \tau)}{\partial x^2}, 0 \leq x < \xi_1(\tau) \\ \frac{\partial t_M(x, \tau)}{\partial \tau} = a_M \frac{\partial^2 t_M(x, \tau)}{\partial x^2}, \xi_1(\tau) \leq x < \xi_2(\tau) \\ \frac{\partial t_T(x, \tau)}{\partial \tau} = a_T \frac{\partial^2 t_T(x, \tau)}{\partial x^2}, \xi_2(\tau) \leq x < L \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $C(x, \tau)$  – концентрация цианида в штабеля, мг/л;  $\tau$  – время, сут;  $x$  – вертикальная координата, направленная вниз, м;  $D$  – коэффициент эффективной диффузии, м<sup>2</sup>/сут;  $q$  – поток влаги через единичное сечение рудного штабеля, м/сут;  $\theta$  – объемная влажность рудного штабеля, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $t$  – температура, °С;  $a_T$  – коэффициент теплопроводности талой среды, м<sup>2</sup>/сут;  $a_M$  – коэффициент теплопроводности мерзлой среды, м<sup>2</sup>/сут;  $\xi_{1,2}(\tau)$  – функция, характеризующая границу раздела талой и мерзлой зоны, зависит от времени;  $K_w(\theta)$  – функция влагопроводности, м/сут;  $H$  –

обобщенный потенциал почвенной влаги (капиллярно - сорбционное давление и гидростатический напор почвенной влаги), м;

$$k_f(t, x) = \begin{cases} \frac{kt(x_0^2 + 1)}{t_{opt}(x^2 + 1)}, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases} - \text{эмпирическая, функциональная зависимость}$$

коэффициента восстанавливающейся сорбционной способности грунта от температуры и содержания кислорода;  $t_{opt}$  – температура, при которой был определен коэффициент восстанавливающейся сорбционной способности грунта, °С;  $k$  - коэффициент, характеризующий восстанавливающуюся сорбционную способность рудного штабеля, 1/сут;  $x_0$  – глубина, на которой был определен коэффициент восстанавливающейся сорбционной способности грунта, м.

Параметры системы дифференциальных уравнений (1) определяются по данным инженерно-геологических и проектных изысканий. Дополним систему уравнений (1) начальными и граничными условиями, исходя из следующих предпосылок:

- в начальный момент времени влажность и концентрация цианида, внедренного в поры грунта, максимальны (константа), так как рудный материал непрерывно поливают цианидсодержщим раствором во время эксплуатации. Они равны, соответственно, полной влагоемкости рудного штабеля  $\theta_{max}$  и концентрации цианидсодержащего раствора, используемого для орошения,  $C^0$ . Температура в рудном штабеле равна температуре раствора, используемого для орошения кучи;

$$\begin{cases} C(x, 0) = C^0 \\ \theta(x, 0) = \theta_{max} \\ t(x, 0) = t_0(x) \end{cases} \quad (2)$$

- на нижней границе рудного штабеля не происходит притока или оттока цианида и тепла и наблюдается свободный отток влаги;

$$\begin{cases} \frac{\partial C(I, \tau)}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial t_r(I, \tau)}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial H(I, \tau)}{\partial x} = -1 \end{cases} \quad (3)$$

- поверхность рудного штабеля подвергается сезонным изменениям температуры, воздействию осадков и испарений

$$\begin{cases} D \cdot \frac{\partial C(0, \tau)}{\partial x} = qC(0, \tau), I(\tau) \leq 0 \\ \frac{\partial C(0, \tau)}{\partial \tau} = -w, I(\tau) > 0 \\ \alpha_r(\tau)(t(\tau) - t_i(0, \tau)) = -\lambda_i \frac{\partial t_i(0, \tau)}{\partial \tau} \\ t_r(\xi) = t_w(\xi) = t_\phi \\ K_w \frac{\partial H(0, \tau)}{\partial x} = I(\tau) \end{cases} \quad (4)$$

где  $w$  – количество синильной кислоты, испаряющейся с поверхности рудного штабеля, мг/(л·сут);  $I(\tau)$  – ряд, содержащий информацию о потоке через поверхность (положительные значения характеризуют осадки, отрицательные испарения) на каждый день, м/сут;  $\lambda_i$  – коэффициент теплопроводности талой или мерзлой среды в зависимости от стадии (промерзание / оттаивание), Вт/(м °С);  $\alpha_r$  – коэффициент теплопередачи;  $t_\phi$  – температура фазового перехода, °С.

## 2. Алгоритмы для решения разработанной математической модели и программное обеспечение для имитации процесса экохимической детоксикации цианидов в отработанном рудном штабеле

Имитация некоторых параметров климата (осадки/испарения, температура, высота снежного покрова) является обеспечением разрабатываемой модели прогнозирования процесса естественного обезвреживания цианида в рудном

штабеле (1-4) входной информацией о метеорологических условиях для определения водно-теплого режима среды.

Имитатор «входных» метеорологических данных разработан на основании следующих предпосылок:

- статистические показатели климата определяются из проектной документации моделируемого объекта;
- температурный ряд воздуха интерполируется на каждый день и не превышает среднемесячных показателей периода и среднеквадратичных отклонений периода;
- количество осадков и испарения не должно превышать среднемесячных и среднесуточных показателей периода;
- дни с осадками определяются случайным образом. Испарение с поверхности рудного штабеля происходит в те дни, когда не выпадают осадки.
- высота снежного покрова не должна превышать максимальных годовых показателей. Снежный покров появляется после установления на поверхности рудного штабеля температуры ниже, чем температура фазового перехода  $t_f$ . Разрушение снежного покрова совпадает по времени с переходом средней суточной температуры воздуха через  $0^\circ\text{C}$  в сторону ее повышения. Сход снежного покрова приближенно будем описывать линейным законом.

В результате разработанный имитатор климата возвращает:  $T(\tau)$  - температурный ряд воздуха на каждый день [ $^\circ\text{C}$ ];  $I(\tau) = \begin{cases} I_{\text{испарение}} \\ - I_{\text{осадки}} \end{cases}$  - ряд,

содержащий информацию о потоке через поверхность (положительные значения характеризуют осадки, отрицательные — испарения) на каждый день, м/сут;  $h_{\text{снега}}(\tau)$  — ряд с высотой снежного покрова на каждый день, м.

Для решения системы дифференциальных уравнений (1-4) использован численный метод конечных разностей. Для аппроксимации уравнений,

входящих в систему (1-4), применена неявная схема, которая является абсолютно устойчивой.

Алгоритм численного решения модели (1-4) естественной деградации цианида в рудном штабеле реализован в виде программы «Прогноз естественного обезвреживания цианидсодержащих рудных штабелей после кучного выщелачивания золота», составленной на языке Object Pascal в среде Delphi 6.

Используя разработанный программный комплекс возможно:

- построить концентрационные поля и линии концентрации цианида в рудном штабеле в любой момент времени;
- определить время, необходимое для очистки кучи от цианидов до ПДК;
- оценить влияние физических свойств рудного штабеля на характер и скорость экохимической деградации цианидсодержащих рудных штабелей, манипулируя миграционными параметрами;
- оценить влияние температуры и влажности на характер и скорость обезвреживания цианидных отходов, манипулируя климатическими параметрами.

**3. Продолжительность периода детоксикации рудного штабеля под действием природных факторов возможно оптимизировать и регулировать за счет правильного выбора сроков начала обезвреживания и своевременной импульсной промывки**

Достоверность моделирования процесса естественного обезвреживания отходов кучного выщелачивания золота была проверена на площадках полностью отработанных месторождений «Самозавское» и «Лопуховское» с помощью разработанного программного комплекса.

После окончания эксплуатации установок кучного выщелачивания «Самозавское» (октябрь 2002г.) и «Лопуховское» (июнь 2001г.) для их обезвреживания ОАО «Иргиредмет» была разработана и использована

технология детоксикации отработанных рудных штабелей под действием природных факторов. В период выдержки проводились лабораторные исследования и опытно-промышленные испытания непосредственно на рудных штабелях с целью определения степени обезвреживания рудной массы под действием природных факторов. Отбор и анализ проб из скважин отработанного штабеля, сложенного из руд месторождений «Самозавское» и «Лопуховское», был проведен в августе 2003, 2004 и 2005 г.г.

В настоящее время в отработанном рудном штабеле Лопуховского месторождения практически все токсичные вещества обезврежились под действием природных факторов, начаты работы по его консервации и рекультивации.

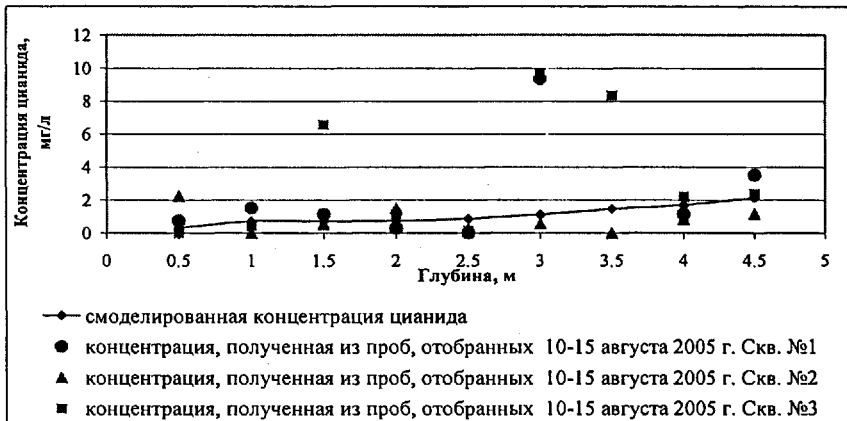


Рис. 1. Анализ соответствия данных о концентрации цианида в отработанном рудном штабеле в августе 2005г. по результатам моделирования и опытно-промышленных испытаний

Используя программный комплекс, разработанный на основании системы уравнений (1) с начальными (2) и граничными условиями (3-4), был проведен вычислительный эксперимент по прогнозу поведения цианида в отработанном рудном штабеле на срок до 1745 суток (около 5 лет) на месторождении «Самолазовское». Получены близкие значения концентраций цианида, расхождения в некоторых точках объясняются неоднородностью рудного штабеля и спецификой рудоподготовки (рис. 1). Эффективность расчета составляет 0.816. Это указывает на то, что модель описывает временную изменчивость близко к реальным данным. Результаты эксперимента, показывают, что очистка рудного штабеля месторождения «Самолазовское» протекает достаточно интенсивно и для полной деструкции цианида потребуются около 5 лет (осень 2007 г.).

Используя возможности программного продукта, были проведены вычислительные эксперименты, по результатам которых сделаны следующие выводы:

1. Применение импульсной промывки на месторождении «Самолазовское» 2-3 раза в течение июля (табл. 2), в дни когда нет осадков, позволило бы сократить продолжительность естественного обезвреживания на 1 год.
2. Проведение работ по кучному выщелачиванию золота на месторождении «Лопуховское» в мае 2001г. заметно продлило общий период детоксикации отработанного рудного штабеля. Если бы выдержка рудного штабеля началась с октября 2000 г., сразу по окончании летнего сезона, то консервацию можно было провести уже в августе 2003г. (табл. 3).

Таблица 2

Смоделированный прогноз концентрации цианида в отработанном рудном штабеле месторождения «Самозавское» с учетом и без учета импульсной промывки (2-3 раза в июле)

Глубина, м	Концентрация цианида, мг/л, август 2006 г.	
	Без импульсной промывки	С импульсной промывкой
0.5	0.00354	0.00017
1.5	0.04779	0.01601
2.5	0.05309	0.01566
3.5	0.10504	0.02710
4.5	0.19347	0.05120

Таблица 3

Сравнение прогнозируемой концентрации цианида в зависимости от выбора начала периода эохимического обезвреживания отработанного штабеля, сложенного из руд месторождения «Лопуховское»

Глубина, м	Прогнозируемая концентрация цианида, мг/л			
	Август 2003 г.		Август 2004 г.	
	Начало обезвреживания			
	Июнь 2001г.	Октябрь 2000 г.	Июнь 2001 г.	Октябрь 2000 г.
1	0.00109	0.00023	0	0
2	0.01289	0.00121	0	0
3	0.03093	0.00247	0	0
4	0.04610	0.00844	0.0018	0
5	0.05925	0.0294	0.0011	0.00076

#### 4. Моделирование процесса естественной детоксикации цианидсодержащих рудных штабелей необходимо осуществлять в функциональной связи с климатическими характеристиками местности

Благодаря возможности программного комплекса манипулировать климатическим параметрами, был проведен вычислительный эксперимент по оценке влияния климатических характеристик местности на процесс естественного обезвреживания отработанных цианидсодержащих рудных штабелей.

Рассчитанные данные показывают, что пренебрежение температурным и влажностным режимами рудного штабеля, занижает прогнозируемую концентрацию почти в 2 раза уже через 30 дней (табл. 4). Соответственно, уменьшается оцениваемое время, необходимое для очистки кучи до ПДК.

Таблица 4

Сравнение прогнозируемой концентрации цианида в отработанном рудном штабеле месторождения «Самолазовское» с учетом и без учета влажностного ( $\theta$ ) и температурного ( $T$ ) режимов

Глубина, м	Прогнозируемая концентрация цианида, мг/л					
	Через 30 дней		Через 90 дней		Через 450 дней	
	с $\theta$ и $T$	без $\theta$ и $T$	с $\theta$ и $T$	без $\theta$ и $T$	с $\theta$ и $T$	без $\theta$ и $T$
0.5	62.23	34.08	2.94	0.1535	0.0046	0
1	95.95	48.18	20.38	4.39	0.08352	0
1.5	107.48	58.96	51.85	8.84	0.4397	0
2	110.05	67.31	69.41	14.02	0.8986	0
2.5	110.26	73.94	77.83	19.42	1.2939	0.0004
3	110.12	79.32	81.25	24.78	1.5885	0.0017
3.5	110.06	83.78	82.63	29.95	1.8182	0.0055
4	110.16	87.53	83.34	34.83	2.0159	0.0135
4.5	110.36	90.73	83.98	39.41	2.2215	0.0279
5	110.54	92.88	84.24	42.72	2.3003	0.0419

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненное диссертационное исследование является научно-квалификационной работой, в которой дано новое решение задачи анализа и оценки продолжительности деструкции токсичных соединений, в отработанном рудном штабеле, имеющее важное технико-экономическое и экологическое значение при обезвреживании отходов кучного выщелачивания золотоизвлекательных фабрик.

Основные научные и прикладные результаты работы сводятся к следующему:

1. Проведенный анализ зарубежного и отечественного опыта естественного обезвреживания цианидсодержащих отходов золотоизвлекательных фабрик позволил выявить основные закономерности и факторы, влияющие на процесс экхимической детоксикации, и определить дальнейшие направления исследований.
2. В соответствии с общей теорией массопереноса предложена математическая модель, описывающая характер и скорость естественной деградации цианидов в отходах установок кучного выщелачивания и позволяющая определять концентрацию цианида в любой момент времени в любой точке рудного штабеля в процессе его постэксплуатационной детоксикации.
3. Дополнительно выявлена эмпирическая функциональная зависимость коэффициента восстанавливающей сорбционной способности грунта от температуры и глубины штабеля, позволяющая с достаточной точностью описать вклад химических процессов в естественное обезвреживание отработанных рудных штабелей.
4. На основании выполненных исследований доказана возможность эффективного применения математического моделирования для прогноза характера и скорости протекания экхимической деструкции цианида в рудном штабеле (эффективность расчета составляет 0.816).

5. В результате моделирования экохимической детоксикации цианида в рудном штабеле выявлено:
- в средней части штабеля, где постоянная положительная температура, процесс деградации цианида протекает с постоянной скоростью;
  - при положительных температурах происходит быстрое обезвреживание верхнего слоя на глубину до 0,5 м за счет испарения;
  - в период весеннего схода снега происходит детоксикация всего рудного штабеля с достаточно высокой скоростью.
6. Установлено и экспериментально обосновано значительное влияние на характер и скорость деградации цианида климатических особенностей местности.
7. Выполненные экспериментальные и теоретические исследования показали, что сроки обезвреживания можно сократить за счет правильного выбора периода начала детоксикации и, если позволяют экономические показатели, своевременной импульсной промывки.
8. Разработан простой в эксплуатации программный комплекс, не требующий дополнительных лабораторных и промышленных исследований, имитирующий процесс естественного обезвреживания цианидсодержащих отходов, который можно использовать на любой стадии проектных работ для разработки и оптимизации уже действующих схем детоксикации отработанных рудных штабелей.
9. Естественное обезвреживание отработанных рудных штабелей месторождений «Лопуховское» и «Самозавское» позволит получить экономический эффект в сумме 7403,2 тыс. руб.

**Основные положения диссертации опубликованы в работах:**

1. Мурашова О.Н., Мурашов Н.М., Петров В.Ф. Моделирование миграции загрязняющих веществ в зонах аэрации и подземных водах с площадок кучного выщелачивания и накопителей отходов // Добыча и переработка золото- и алмазосодержащего сырья. – Иркутск: Иргиредмет, 2001. – С. 212-226.
2. Мурашов Н.М., Петров В.Ф., Мурашова О.Н. Прогнозирование экологических последствий аварийных ситуаций на золотодобывающих предприятиях кучного выщелачивания. // Добыча и переработка золото- и алмазосодержащего сырья. – Иркутск: Иргиредмет, 2001. – С.226-232.
3. Петров С.В., Петров В.Ф., Чикин А.Ю., Мурашова О.Н. Естественная деградация тиоцианатов в среде отработанного рудного штабеля // Экологические проблемы и новые технологии комплексной переработки минерального сырья (Плаксинские чтения): Труды международного совещания (16-19 сентября 2002 г.). – Чита: ЧитГТУ, 2002. – Ч.1. - С. 121-126.
4. Мурашова О.Н., Мурашов Н.М., Петров В.Ф., Чикин А.Ю. Применение математического моделирования на этапе проектирования хвостохранилищ (накопители отходов) // Экологические проблемы и новые технологии комплексной переработки минерального сырья (Плаксинские чтения): Труды международного совещания (16-19 сентября 2002 г.). - Чита: ЧитГТУ, 2002. – Ч.1. - С. 126-132.
5. Мурашова О.Н., Мурашов Н.М., Петров В.Ф., Чикин А.Ю. Применение математического моделирования на этапе создания технологических процессов обезвреживания промышленных отходов // Технологическое образование: состояние, проблемы и перспективы развития: Материалы Всероссийской научно-практической конференции (26-29 сентября 2002 г.). - Иркутск: ИГПУ, 2002. – С. 70-77.
6. Петров С.В., Петров В.Ф., Чикин А.Ю., Мурашова О.Н. Разработка технологии естественной деградации тиоцианатов в среде золотосодержащих промышленных отходов // Технологическое образование: состояние, проблемы

и перспективы развития: Материалы Всероссийской научно-практической конференции (26-29 сентября 2002 г.). - Иркутск: ИГПУ, 2002. – С. 93-98.

7. Мурашова О.Н., Чикин А.Ю., Мурашов Н.М., Петров С.В. Математическое моделирование процессов естественной детоксикации в рудном штабеле // Известия СПб ЛТА. - 2006. - №1 (34). - С. 47-53.

8. Мурашов Н.М., Мурашова О.Н., Петров В.Ф., Петров С.В. Математическое моделирование процесса экохимического обезвреживания цианида в рудном штабеле после кучного выщелачивания золота // Актуальные вопросы защиты окружающей среды и безопасность территорий регионов России: Материалы III Всероссийской конференции с международным участием. - Улан-Удэ: ВСГТУ, 2006. – С. 97-101.

9. Петров С.В., Петров В.Ф., Мурашов Н.М., Лабунь А.Н., Татаринцов С.М., Колчанов В.А., Сахно В.Г., Мурашова О.Н. Применение метода естественного обезвреживания отходов кучного выщелачивания золота на рудах месторождения «Лопуховское» // Актуальные вопросы защиты окружающей среды и безопасность территорий регионов России: Материалы III Всероссийской конференции с международным участием. - Улан-Удэ: ВСГТУ, 2006. – С. 113-117.

ОАО «Иргиредмет» 14.09.2006. З.78. Т.100 экз.

664025, г. Иркутск, б-р Гагарина, 38

