

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

**на диссертационную работу и автореферат Тчаро Хоноре**

**«Разработка перспективных способов интенсификации кучного выщелачивания золота», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 25.00.13 – «Обогащение полезных ископаемых»**

### **Актуальность темы диссертационной работы**

Диссертационная работа Тчаро Хоноре посвящена решению актуальной проблемы переработки бедного сырья – повышению эффективности кучного выщелачивания золота из руд. Технология извлечения металлов методом кучного выщелачивания (КВ) находит все более широкое применение во всем мире, в том числе и в России. Более 40% мировой добычи золота к концу двадцатого века приходилось на кучное выщелачивание.

Опыт эксплуатации золотодобывающими предприятиями технологии кучного выщелачивания показал, что она может успешно применяться для переработки бедных руд с минимальным содержанием золота до 0,5 г/т на многих месторождениях, в том числе небольших по запасам. Несмотря на более низкое извлечение золота, по сравнению с традиционными технологиями цианирования руд на золотоизвлекательных фабриках, кучное выщелачивание имеет ряд неоспоримых преимуществ, связанных с низкими капитальными и эксплуатационными затратами, простотой ведения процесса, быстрым вводом в эксплуатацию. На эффективность технологии КВ прежде всего оказывают влияние вещественный состав рудного сырья, способы рудоподготовки и формирования рудного штабеля, параметры и режимы орошения кучи, природно-климатические факторы, принятые технологии переработки продуктивных растворов.

Одним из путей повышения эффективности процесса кучного выщелачивания является выбор оптимальных режимов обработки штабеля технологическими растворами, т.к. под влиянием различных, в том числе и природных, факторов происходит снижение качественных характеристик и потеря технологических растворов за счет их испарения из штабеля КВ, или же, наоборот, разбавления атмосферными осадками.

Другой проблемой, приводящей к снижению эффективности технологии КВ, является возникновение в объеме штабеля малопроницаемых слоев и зон, недоступных для технологических растворов, а также весьма низкое извлечение наноразмерного золота.

Для решения технологических и геоэкологических проблем КВ автором работы научно обоснованы и разработаны методы и предложения по повышению эффективности кучного выщелачивания золота путем обеспечения изоляции поверхности штабеля, повышения проницаемости штабеля за счет разрушения малопроницаемых слоев и снижения потерь нанозолота, находящегося в закольматированных зонах.

В связи с вышеизложенным представленная работа является весьма актуальной, решающей важную научную и практическую задачу.

**Целью исследования** являлась разработка способов интенсификации кучного выщелачивания золота из руд за счет экранирования штабеля КВ, контролируемого изменения характеристик технологических растворов и разрушения малопроницаемых слоев руды.

**Основная идея работы** заключалась в обосновании возможности стабилизации свойств технологических растворов путем сохранения и/или изменения их качественных характеристик с одновременным улучшением фильтрационных параметров штабеля кучного выщелачивания.

### **Поставленные задачи диссертационного исследования были решены путем:**

- установления оптимальных условий использования различных покрытий;
- разработки нового, эффективного способа экранирования поверхности штабеля КВ;
- разработки роботизированного устройства, позволяющего увеличить фильтрационную способность малопроницаемых слоев рудного штабеля и, тем самым, способствующего более эффективной обработке штабеля КВ выщелачивающими растворами;
- выявления механизмов потерь нанозолота на основе формирования «островков» и пленок плавучего золота, что позволяет обосновать новые решения для повышения извлечения наноразмерных золотин в процессе КВ.

Для решения поставленных задач автор диссертации использовал комплекс различных методов исследования: системно-структурный анализ процессов, определяющих испарение, разбавление, просачивание технологических растворов в штабелях КВ; приборно-аналитические и экспериментальные методы исследований в лабораторных и натуральных условиях; методы математического и компьютерного моделирования.

### **Структура и содержание диссертационной работы**

Диссертационная работа Тчаро Хоноре состоит из введения, 3 глав, заключения, списка литературы из 140 наименований; изложена на 142 страницах машинописного текста, включая 22 таблицы и 60 рисунков.

**В первой главе** представлен обзор и анализ факторов, влияющих на эффективность кучного выщелачивания золотосодержащих руд, и способы устранения негативного воздействия этих факторов. Показано, что наибольшее влияние оказывает концентрация технологических растворов, отклонение от оптимальных параметров которых связано с их испарением и/или разбавлением атмосферными осадками. Приведены зависимости испарения от таких внешних факторов, как способ орошения выщелачивающим раствором, природно-климатических условий, гранулометрического состава рудного материала и др. Вторым по значимости фактором является снижение фильтрационной способности рудного штабеля вследствие образования малопроницаемых закольматированных слоев. Дан анализ причин образования внутри штабеля КВ малопроницаемых слоев, а также причин потерь наноразмерного золота при кучном выщелачивании золотосодержащего сырья. На основе данных отечественных и зарубежных научно-технических публикаций автором приведен анализ способов решения обозначенных в диссертационной работе проблем.

**Во второй главе** рассмотрены используемые в диссертации методы и методики исследования, в том числе по предотвращению испарения и разбавления технологических растворов с применением кремнийорганических соединений, лабораторных исследований фильтрационных характеристик рудного штабеля, математического расчета значений фильтрации технологических растворов через штабель КВ, расчета гидравлической проницаемости при образовании вертикальных и наклонных каналов. Приведены результаты компьютерного моделирования процессов фильтрации, движения кислорода в штабеле, а также математического моделирования процессов взаимодействия между наночастицами золота в жидкой среде.

**В третьей главе** диссертации приведены результаты проведенных исследований по интенсификации технологии кучного выщелачивания золотосодержащих руд.

Лабораторными экспериментами показана эффективность применения нанопленочных силиконовых материалов для изоляции штабеля КВ и предотвращения тем самым испарения технологических растворов и снижения негативного воздействия природных факторов на штабель, обусловленного образованием прочного покрытия на поверхности штабеля в результате полимеризации силиконовой жидкости на основе модифицированного силикона МС-1. Вес такого покрытия составляет 50-1000 г/м<sup>2</sup>. Показано, что долговечность полимерной пленки достигает 14-16 месяцев, она характеризуется пониженной влагопроницаемостью и повышенной термостойкостью, что делает возможным использование этой технологии в регионах с жарким климатом.

Автором была проведена оценка влияния различных факторов на качество получаемых продуктивных растворов. Показано, что уменьшение содержания золота в продуктивных растворах напрямую связано со снижением фильтрационной способности рудного материала. Методом компьютерного моделирования дана прогнозная оценка направления и скорости движения технологических флюидов в рудном штабеле. Разработанная математическая модель позволила установить зависимость проницаемости массива от объема исследуемого слоя, объема порового пространства в выщелачиваемых рудах, начальной пористости слоя, а также от числа, диаметра, высоты и угла наклона фильтрационных каналов. Полученные теоретические данные были подтверждены результатами лабораторных исследований.

Для повышения фильтрации технологических растворов в штабелях КВ автором работы предлагается технология с использованием мобильных малогабаритных роботизированных устройств, что позволит создать в штабеле оптимальные гидродинамические условия и увеличить тем самым эффективность фильтрации растворов как минимум на 15% и более. Автором разработано устройство мобильного малогабаритного робота, предназначенного для работы в несвязанной среде, оснащённое устойчивым к воздействию химических реагентов, коррозии, истиранию и давлению налегающих кусков почвы корпусом со средним диаметром 5-10 мм, с утолщением к его середине, и средней длиной 10 см и более, с блоком управления, передатчиком/приемником (для передачи данных о движении и мониторинга местонахождения робота, а также информации об окружающей среде, а кроме этого – для приема управляющих сигналов с диспетчерского пункта), движителями, аккумулятором электрической энергии (для обеспечения непрерывной работы устройства) и датчиками (для получения информации о давлении, температуре, физико-механических свойств массива).

Результаты компьютерного моделирования в системе SVoffice до и поле восстановления проницаемости рудного штабеля с применением малогабаритных роботизированных устройств показали, что гидравлическая проводимость технологических растворов в малопроницаемых слоях существенно повышается. Направление движения роботов и направление формирования каналов определяется содержанием золота в рудном штабеле. Управление роботизированными устройствами осуществляется с диспетчерского пункта. Установлено, что проницаемость рудного штабеля при наличии каналов, пройденных роботами, увеличивается более чем в 100 раз, что увеличивает фильтрационную способность массива выщелачиваемых руд и доступ технологических растворов к частицам золота, заключенным в зонах коагуляции.

Диссертантом изучен механизм образования и потерь «островков» и «пленок» плавучего золота крупностью 5-120 нм. Установлено, что агрегирование отдельных нанозолотин в «островки» и пленки происходит при сближении их на расстояние, меньшее 7 нм, при расстоянии между частицами более 7 нм взаимодействия между ними не происходит. Для снижения потерь наноразмерного золота при кучном выщелачивании автором предложена технология, предусматривающая применение поверхностно-активных веществ для снижения поверхностного натяжения продуктивных растворов, что способствует потере нанозолотинами первоначальной «плавучести», опусканию их в объеме раствора на дно сборочного бассейна коробчатого типа, где они затем будут извлечены.

Выводы по главам и заключение по диссертационной работе в полном объеме отражают полученные результаты исследований.

### **Научная новизна исследований, полученных результатов, выводов и рекомендаций**

Для достижения поставленной цели автором был использован комплекс современных теоретических и экспериментальных методов исследования. В диссертационной работе выполнены научные исследования и получены новые научные данные, применение которых позволит повысить эффективность переработки золотосодержащих руд методом кучного выщелачивания.

1. Диссертантом разработана принципиально новая технология эффективного защитного экранирования рудного штабеля КВ от негативного воздействия различных факторов с использованием нанопокртия на основе кремнийорганических соединений, что позволит предотвратить испарение и /или разбавление технологических растворов и поддержать рабочую концентрацию цианидов и другие параметры в оптимальном диапазоне значений:  $C=0,6-0,8$  г/дм<sup>3</sup>, рН=9-11, Eh=-610 мВ.

2. Разработаны малогабаритное роботизированное устройство и технология на основе его применения в массиве рудного штабеля, что способствует разрушению малопроницаемых закольматированных зон в массиве штабеля КВ, увеличению их фильтрационной способности и, как следствие, повышению извлечения золота в раствор.

3. Предложен способ обработки продуктивных растворов выщелачивания неионогенными поверхностно-активными веществами типа полисорбатов Tween 80, понижающими поверхностное натяжение технологических растворов до 0,04 Н/м, для повышения извлечения «островков» и пленок «плавучего» золота крупностью 5-120 нм. Обработка растворов осуществляется в специальной емкости (коробе), предназначенном для сбора растворов и осаждения шламов.

Представленные в диссертационной работе новые технические решения защищены тремя Евразийскими патентами и зарегистрированной заявкой на изобретение.

**Практическое значение диссертационной работы** заключается в разработке технологии защитного геомембранного покрытия поверхности штабеля КВ полимерной силиконовой пленкой; в разработке малогабаритного роботизированного устройства и технологии, позволяющей регулировать фильтрационные характеристики рудного штабеля; в разработке технологического режима обработки продуктивных растворов КВ

поверхностно-активными веществами для повышения уровня извлечения частиц «плавучего» нанозолота.

**Научное значение результатов диссертационной работы** заключается в установлении корреляции между величиной потерь и снижением качества технологических растворов от воздействия температуры воздуха, его относительной влажности, скорости ветра, уровня солнечной радиации с учетом применяемой системы орошения и наличия защитного покрытия поверхности рудного штабеля; в обосновании механизма образования «плавучих» агрегатов пленок и «островков», состоящих из частиц наноразмерного золота.

**Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций**, сформулированных в работе, подтверждается использованием комплекса аналитических и экспериментальных методов исследований в лабораторных и натуральных условиях, использованием методов математического и компьютерного моделирования с применением сертифицированного программного обеспечения, непротиворечивостью полученных теоретических данных и практических результатов и выводов.

**Личный вклад автора** состоит в анализе и обобщении мирового опыта использования технологии кучного выщелачивания золотосодержащих руд; постановке задач и проведении экспериментальных исследований по выявлению эффективности кремнийорганических соединений при герметизации штабеля КВ и по разрушению малопроницаемых закольматированных слоев внутри штабеля КВ; адаптации среды SVOffice для выполнения поставленных задач и создании математических и компьютерных моделей изменения фильтрационных характеристик штабелей кучного выщелачивания.

**В качестве положительных сторон диссертационной работы Тчаро Хоноре следует отметить:**

1. Тщательно выполненный обзор технологий кучного выщелачивания. Анализ причин потерь рабочих растворов под воздействием различных факторов. Анализ применимости различных вариантов процессов кучного выщелачивания в экстремальных условиях субэкваториального климата государства Буркина-Фасо с продолжительностью сухого сезона до 8–10 месяцев.

2. Обзор форм нахождения и поведения при выщелачивании наноразмерных частиц золота, обоснование реагентных режимов, позволяющих повысить извлечение золота за счет гидрофилизации наноразмерных частиц золота с их последующим извлечением. Результаты работы могут представлять существенный интерес для экономики, т.к. экспорт Буркина-Фасо на 79 % представлен золотом.

3. Автором предложена замена полимерных пленок и геомембран на пленки, образуемые напылением кремнийорганических пленкообразующих жидкостей, что повышает срок службы водо- и паронепроницаемого покрытия в условиях высоких температур и ветровой нагрузки.

4. Проведены эксперименты и расчеты, позволившие найти оптимальные параметры каналов, которые необходимо прокладывать в рудном штабеле для интенсификации процесса КВ.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на различных представительных международных научных форумах, конференциях, симпозиумах. Содержание и основные результаты работы в полной мере отражены в автореферате и публикациях автора. По теме диссертации опубликовано 13 работ, в том числе 4 статьи в журналах из перечня ВАК Минобрнауки РФ, 4 статьи в изданиях, входящих в информационно-аналитические системы международного цитирования: Scopus – 3 статьи, Web of Science (изд-во Springer) – 1 статья. Получен Евразийский патент на изобретение и 3 положительных решения о выдаче евразийских патентов на изобретение.

### **Замечания и рекомендации по работе**

1. В диссертации отсутствует важная и необходимая количественная информация по факторам, определяющим разбавление технологических растворов (раздел 1.3). Автор ограничился только качественной информацией, причем преимущественно компилятивного характера.
2. В разделе 1.4 «Факторы, определяющие образование малопроницаемых слоев в штабеле КВ» целесообразно было представить зависимости количества и численных характеристик процессов образования отдельных малопроницаемых слоев, которые могли бы служить объективной оценкой повышения эффективности используемой технологии.
3. Основное замечание – содержание раздела 3.2.1 «Разработка специализированного робота, предназначенного для работы в несвязанной среде». Содержание раздела представляет собой обзор некоторых типов наноразмерных молекул, обладающих эффектом фототропизма (так называемых «молекулярных роботов») и нереализуемые в обозримом будущем предложения по созданию управляемых диспетчером механических роботизированных устройств диаметром 5-10 мм для прокладки каналов в штабелях руды. Никаких расчетов, даже ориентировочно-предварительных, по сопротивлению среды, необходимой мощности, аккумуляторов энергии, устройств связи, и прочности деталей движителя не приведено. Нет никакой информации о стоимости роботизированных устройств.
4. Помимо этого, не ясно, каким образом незащищенные каналы (как прямые, так, тем более, извилистые), проделанные роботами, с сечением 5–10 мм не будут «схлопываться» под действием пластового давления. В штабеле руды КВ уже на глубине 10 м давление достигает приблизительно 150 кПа.
5. В диссертации не рассмотрен механизм образования свободных наночастиц золота, а также численные параметры этого процесса, хотя одно из защищаемых положений и глава 3 диссертации, так или иначе, сводятся к нанозолоту.
6. В диссертации нет объяснения, почему нанострочки и поверхностные пленки нанозолота не растворяются технологическими растворами (цианистыми и

другими), хотя это является основополагающим аспектом разрабатываемой диссертантом технологии.

7. Также вызывает сомнение тезис о том, что наноразмерные и более крупные частицы золота переходят в пластинчатую (чешуйчатую) форму в процессах экскавации руды, ее транспортирования и складирования.
8. К сожалению, в диссертационной работе встречаются грамматические, орфографические ошибки, терминологические неточности, например, «ветродуй», «объемная вода», «молекулы воды прозрачны» (рис. 3.28), «потенциал взаимодействия, используемый для моделирования Монте-Карло» (рис. 3.32) и др.

Высказанные вопросы и замечания не снижают значимость и новизну научных положений, общую положительную оценку работы.

### Общее заключение

Диссертационная работа Тчаро Хоноре на тему «Разработка перспективных способов интенсификации кучного выщелачивания золота», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук, соответствует паспорту научной специальности 25.00.13 – «Обогащение полезных ископаемых».

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, обладающей внутренним единством, научной новизной и практической значимостью. В работе дано решение актуальной научно-технической проблемы интенсификации технологии кучного выщелачивания золота, имеющей важное значение для развития минерально-сырьевого комплекса и горно-перерабатывающей отрасли промышленности. Выводы и рекомендации достаточно обоснованы.

Диссертационная работа отвечает требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям в соответствии в п.9 Положения о присуждении ученых степеней, а ее автор – Тчаро Хоноре зарекомендовал себя как сложившийся ученый-исследователь и заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 25.00.13 – «Обогащение полезных ископаемых».

Заведующий кафедрой Обогащения и переработки  
полезных ископаемых и техногенного сырья НИТУ «МИСиС»,  
кандидат технических наук, доцент

Т.И. Юшина

26.05.2021

Подпись руки Юшиной Т.И. подтверждаю:  
Проректор НИТУ «МИСиС» по безопасности и  
общим вопросам



И.М. Исаев

## СВЕДЕНИЯ

### об официальном оппоненте по диссертационной работе

Тчаро Хоноре

#### «Разработка перспективных способов интенсификации кучного выщелачивания золота»

ФИО	Место основной работы (полное наименование, адрес, контакты, должность)	Ученая степень (документ о присвоении степени)	Ученое звание (документ о присвоении звания)
Юшина Татьяна Ивановна	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (ФГАОУ ВО НИТУ «МИСиС»), 119049, Россия, г. Москва, Ленинский проспект, д.4 e-mail: <a href="mailto:yushina.ti@misis.ru">yushina.ti@misis.ru</a> Тел.: +7 499 230-24-46 Должность: заведующий кафедрой Обогащения и переработки полезных ископаемых и техногенного сырья	Кандидат технических наук  Диплом КТ № 037818 о присуждении степени кандидата технических наук, степень присуждена решением диссертационного совета Московского Государственного горного университета от 14 ноября 1997 г. (протокол № 44)	Доцент  Аттестат ДЦ № 045133 о присвоении ученого звания доцента по кафедре обогащения полезных ископаемых, звание присуждено приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 28 мая 2012 г. № 265/нк-2

#### Основные публикации по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет

1. Yushina, T.I., Purev, B., Namuungerel, B. Substantiation of the erdenetiyn-ovoo copper-molybdenum ore flotation technology with the use of tertiary acetylene alcohols // Non-ferrous Metals, 2020, 49(2), стр. 3–10
2. Yushina, T.I., Purev, B., Yanes, K.S.D., Malofeeva, P.R. Improvement of porphyry copper flotation efficiency with auxiliary collectors based on acetylene alcohols // Eurasian Mining, 2019, 2019(1), стр. 25–30
3. Yushina, T.I., Purev, B., D'Elia, K., Namuungerel, B. Analysis of technological schemes and substantiation of the selection of the reagent regimes for coppermolybdenum ores flotation // Non-ferrous Metals, 2019, 46(1), стр. 3–11
4. Bocharov, V.A., Yushina, T.I., Ignatkina, V.A., Kayumov, A.A., Petrov, I.M. On the selection of technologies of comprehensive processing of ores of nonferrous and rare metals based on penetrative disclosure of minerals comprehensive processing // IMPC 2018 - 29th International Mineral Processing Congress, 2019, стр. 1214–1221
5. Yushina, T.I., D'Elia, K., Malyshev, O.A., Ogrel, L.D., Petrov, I.M. Flotation of gold-bearing non-ferrous ores with acetylene alcohol-based reagents // IMPC 2018 - 29th International Mineral Processing Congress, 2019, стр. 1425–1433



6. Юшина Т.И., Петров И.М., Матвеев А.И., Матвеев И.И. Обзор рынка рудного золота и технологий его переработки и обогащения // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2018. № S1. С. 408-437.

7. Yushina, T.I., Malyshev, O.A., Shchelkunov, S.A. Flotation of gold-bearing ores of non-ferrous metals using the acetylene alcohol based reagents // Tsvetnye Metally, 2017, (2), стр. 13–19

8. Bocharov, V.A., Ignatkina, V.A., Yushina, T.I., Chanturia, E.L. Sound processing of natural and waste pyrite-pyrrhotine feedstock of nonferrous metals // Gornyi Zhurnal, 2017, (9), стр. 77–84

9. Бочаров В.А., Игнаткина В.А., Чантурия Е.Л., Юшина Т.И. Технологии комплексной переработки упорных колчеданных руд и пиритных техногенных продуктов с извлечением цветных и редких металлов // Цветные металлы. 2016. № 9 (885). С. 16-21.

Заведующий кафедрой Обогащения и переработки

полезных ископаемых и техногенного сырья НИТУ «МИСиС»,

кандидат технических наук, доцент



Т.И. Юшина