

На правах рукописи



Баянов Алексей Евгеньевич

**ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ
КРУГЛОГОДИЧНОГО КУЧНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ
ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ РУД В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР
(НА ПРИМЕРЕ САВКИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ)**

Специальность

25.00.22 - Геотехнология (подземная, открытая и строительная)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Чита – 2015

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО
«Забайкальский государственный университет»

**Научный
руководитель**

Мязин Виктор Петрович,
доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры обогащения полезных ископаемых и вто-
ричного сырья ФГБОУ ВПО «Забайкальский госу-
дарственный университет»

**Официальные
оппоненты:**

Фазлуллин Марат Исмаилович,
доктор технических наук, профессор, генеральный
директор ООО «Научно-производственное пред-
приятие «ГЕОТЭП»

Зыков Николай Васильевич,
кандидат технических наук, доцент, директор ГОУ
СПО «Забайкальский горный колледж им. М.И.
Агошкова»

**Ведущая
организация**

**Институт горного дела Севера
им. Н.В. Черского СО РАН (ИГДС СО РАН)**

Защита состоится 16 июня 2015 г. 14⁰⁰ часов на заседании диссертацион-
ного совета Д 212.299.01 при Забайкальском государственном университете (г.
Чита, ул. Александрo-Заводская, 30, зал заседаний ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Забай-
кальский государственный университет» по адресу: 672000, ул. Кастринская, 1
и на сайте ЗабГУ:

http://zabgu.ru/php/page.php?query=bayanov_aleksej_evgen%27evich

Автореферат разослан «15» апреля 2015 г.

Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим
направлять по адресу: 672039, г. Чита, ул. Александрo-Заводская, 30, ЗабГУ,
ученому секретарю совета Д 212.299.01.

Факс: (3022) 41-64-44; Web-server: www.zabgu.ru; E-mail: root@zabgu.ru

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.299.01
канд. техн. наук, доцент



И.А. Бондарь

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. За последние 25 лет в России введено в эксплуатацию более 30 промышленных установок для кучного выщелачивания (КВ) золотосодержащих руд. Данная технология по сравнению с другими методами переработки сырья характеризуется гораздо более низкими капитальными затратами и уровнем издержек производства.

Однако, используемая базовая технология сезонного кучного выщелачивания золота, имеет ряд существенных недостатков, ограничивающих область ее применения. К наиболее существенному относится отсутствие направленного регулирования процессом теплообмена внутри рудного штабеля при выщелачивании в условиях низких температур горных пород. При выщелачивании в таких условиях значительно снижается интенсивность растворения металлов и скорость миграции металлоносных растворов. Поэтому дальнейшее совершенствование технологии КВ заключается в создании таких технических решений, которые позволят не только снизить воздействие низких температур горных пород на процесс извлечения золота, но и продлить сезон работы вплоть до круглогодичного.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с программой фундаментальных исследований ИГД СО РАН VII.74.4. «Развитие научных основ комплексного освоения месторождений Сибири: создание ресурсосберегающих инновационных геотехнологий добычи и обогащения твердых полезных ископаемых в сложных горнотехнических и геомеханических условиях», в рамках научного проекта VII.74.4.2. «Разработка теоретических основ экологически безопасных технологий выщелачивания дисперсного золота и редких металлов со стадийной активацией массообменных процессов и флотационного разделения минералов с близкими поверхностными свойствами и их адаптация к особенностям минерально-сырьевой базы Забайкальского края» (№ гос. рег. 01201353206).

Степень разработанности темы. Научные исследования по изучению технологии КВ ведутся в организациях и институтах, таких как: ОАО «Иргиредмет», ЦНИГРИ, ВНИИХТ, МГГУ, МГРИ, МИСиС, ЗабГУ и др. Значительный вклад в совершенствование технологии КВ внесли ученые: Аренс В.Ж., Фазлуллин М.И., Чантурия В.А., Воробьев А.Е., Дементьев В.Е., Минеев Г.Г., Мязин В.П., Лодейщиков В.В., Овсейчук В.А., Лизункин В.М., Рубцов Ю.И., Секисов А.Г., Рашкин А.В., Резник Ю.Н., Шестернев Д.М., Шумилова Л.В., Садыков Р.Х., Черняк А.С., Хохряков А.В., Птицын А. Б., и многие другие.

При этом круглогодичное кучное выщелачивание в России практически не внедрено, что говорит о необходимости дополнительных исследований, направленных на изучение теплофизических свойств рудного штабеля при выщелачивании в условиях низких температур.

Цель работы – теплофизическое обоснование повышения эффективности круглогодичного кучного выщелачивания золотосодержащих руд.

Идея работы заключается в интенсификации процесса кучного выщелачивания золота в условиях низких температур за счет перехода от медленного

инфильтрационного режима миграции растворов к направленному фильтрационному, путем прогрева штабеля внешним источником тепла.

Объект исследований – рудный штабель для кучного выщелачивания золотосодержащих руд.

Предмет исследований – технология круглогодичного выщелачивания золотосодержащих руд в условиях низких температур.

Основные задачи исследований:

- провести экспериментальные исследования по прогреву рудного штабеля и на их основе разработать теплофизическую модель кучного выщелачивания в условиях низких температур;
- выявить закономерность распространения тепла при прогреве рудного штабеля источником внешнего тепла;
- обосновать рациональные конструктивные параметры рудного штабеля как одного из важнейших элементов геосистемы кучного выщелачивания;
- провести сравнительную технико-экономическую оценку сезонного и круглогодичного кучного выщелачивания золотосодержащих руд.

Научная новизна работы:

1. Установлена зависимость распространения теплового поля, создаваемого источником внешнего тепла, от режимных параметров (коэффициента теплопроводности рудного материала – K_m , коэффициента теплоотдачи теплоносителя – K_{mo} , продолжительности прогрева – T_{np} , разности начальной температуры пород рудного штабеля и температуры теплоносителя – Δt°):

$$x = \pm \sqrt{K_m \times K_{mo} \times 10^{-4} \times (T_{np} \times \ln \Delta t^\circ)^{0,69} \times (y + K_m \times K_{mo} \times 10^{-4} \times (T_{np} \times \ln \Delta t^\circ)^{0,69})}$$

2. Установлены закономерности изменения продолжительности прогрева рудного штабеля в зависимости от температуры теплоносителя и начальной температуры горных пород, слагающих штабель.

3. Предложена методика расчета конструктивных параметров рудного штабеля.

4. Обоснована экономическая целесообразность круглогодичного кучного выщелачивания золота с предварительным прогревом рудного штабеля источником внешнего тепла на основе методики учета суммарного коэффициента условий.

Практическая ценность работы:

1. Разработаны поточные линии для круглогодичного кучного выщелачивания золотосодержащих руд с применением подогрева рудного штабеля источником внешнего тепла.

2. Разработана компьютерная теплофизическая модель рудного штабеля для оценки эффективности применения круглогодичного кучного выщелачивания.

3. Установлены рациональные конструктивные параметры штабеля для ведения круглогодичного кучного выщелачивания руд.

Методы исследований: анализ и обобщение опыта выщелачивания в условиях низких температур; изучение физических свойств проб рудного материала; экспериментальные исследования по прогреву рудного штабеля, созда-

ние геометрических моделей с помощью AutoCAD, теплофизическое моделирование рудного штабеля с помощью ANSYS Workbench; методы математической статистики; технико-экономическая оценка эффективности сезонного и круглогодичного кучного выщелачивания золотосодержащих руд.

Основные защищаемые научные положения.

1. Разработана математическая модель переноса тепла в рудном штабеле для определения основных теплофизических параметров, влияющих на эффективность режимов фильтрационного выщелачивания золотосодержащих руд при низких температурах.

2. Круглогодичное кучное выщелачивание золотосодержащих руд достигается путем первоначального укрытия рудного штабеля теплозащитным покрытием с последующей подачей в него теплоносителя от внешнего источника.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов подтверждается корректной постановкой и решением задач исследований, достаточным объемом моделирования различных тепловых режимов в рудном штабеле, достаточной сходимостью результатов проведенных экспериментов и результатов моделирования – коэффициент достоверности аппроксимации для выявленных зависимостей 0,93-0,95, согласованностью полученных данных с данными других исследований.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международном совещании «Новые технологии обогащения и комплексной переработки труднообогатимого природного и техногенного минерального сырья» (Верхняя Пышма, 2011 г.), на Международных научно-практических конференциях «Кулагинские чтения» (Чита, 2010–2013 гг.), на Международных молодежных научно-практических конференциях «Молодежь Забайкалья: молодость, наука, прогресс!» (Чита, 2012–2013 гг.), на заседании научно-технического совета ИМЗ им. И.П. Мельникова СО РАН (Якутск, 2013 г.), на заседании научно-технического совета Забайкальского филиала ООО «ТОМС инжиниринг» (Чита, 2014 г.).

Личный вклад автора состоит в:

- анализе и обобщении отечественного и зарубежного опыта ведения кучного выщелачивания в условиях низких температур;
- постановке и проведении экспериментальных исследований по прогреву рудного штабеля;
- адаптации среды ANSYS Workbench для выполнения поставленных задач и создания моделей рудного штабеля;
- разработке теплофизических моделей рудного штабеля при круглогодичном выщелачивании в условиях низких температур;
- проведении сравнительной технико-экономической оценки предложенных технических решений для реализации круглогодичного кучного выщелачивания.

Реализация результатов работы. Основные результаты исследования внедрены в инжиниринговую деятельность Забайкальского филиала ООО «ТОМС инжиниринг» в г. Чита при разработке проектной документации «Про-

мышленная отработка золоторудного месторождения «Савкинское». Расширение производства» (акт №2, от 18.03.2015 г.), а также в учебный процесс ФБГОУ ВПО «Забайкальский государственный университет» при подготовке специалистов по направлению 130400.65 «Горное дело» по дисциплинам: основы металлургии, экономика и менеджмент горного производства (акт № 14.1-958, от 27.03.2015).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 12 работ, в том числе: 5 научных статей в изданиях из списка рекомендованных ВАК, 7 статей в научных периодических сборниках, материалах и трудах международных, всероссийских и региональных научно-технических конференций. Получено 2 патента РФ на изобретение.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения и библиографического списка из 121 наименования, содержит 150 страниц машинописного текста, в том числе 22 таблицы, 31 рисунок, и 2 приложения на 2 страницах.

Автор выражает свою признательность научному руководителю, заслуженному деятелю наук РФ, профессору, д-ру техн. наук Мязину В.П., профессору, д-ру техн. наук Шестерневу Д.М. за оказанную методическую помощь при постановке исследований, профессору, д-ру техн. наук Шумиловой Л.В. за методическую помощь при написании отдельных глав диссертации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе выполнен анализ отечественного и зарубежного опыта сезонного и круглогодичного кучного выщелачивания золота в рудном штабеле. Проанализированы патентно-защищенные технические решения, рекомендованные к использованию, с целью продления сезона кучного выщелачивания золота в условиях низких температур. Описаны климатические, геокриологические, горно-геологические и горнотехнические особенности Савкинского месторождения, как объекта формирования рудного штабеля кучного выщелачивания золотосодержащих руд. Сформулированы цель и задачи исследований.

Во второй главе представлена методика проведения испытаний на лабораторном стенде по изучению теплофизических особенностей рудного штабеля при его прогреве. Описаны эксперименты, проведенные на рудах Савкинского месторождения, и представлены полученные результаты. На основании полученных данных установлены зависимости распространения тепловых полей в рудном штабеле от температуры теплоносителя и продолжительности его подачи.

Третья глава посвящена тепловому моделированию рудного штабеля КВ. Проведено компьютерное моделирование рудного штабеля при формировании его в различных климатических и геокриологических обстановках. Предложены практические рекомендации технического и технологического характера, для реализации круглогодичного КВ. Получены закономерности изменения продолжительности прогрева рудного штабеля от температуры теплоносителя и начальной температуры пород штабеля.

Четвертая глава посвящена разработке эффективной технологии круглогодичного КВ в условиях низких температур. В качестве технических решений предложены патентно-защищенные поточные линии для круглогодичного КВ золота. Обоснованы рациональные конструктивные параметры рудных штабелей при выщелачивании в условиях низких температур.

Пятая глава посвящена экономическим аспектам эффективного кучного выщелачивания в условиях низких температур. Предложена методика определения суммарного коэффициента условий для предварительной оценки эффективности круглогодичного кучного выщелачивания. Произведена сравнительная технико-экономическая оценка кучного выщелачивания в условиях низких температур Забайкалья на примере Савкинского месторождения.

В заключении диссертации представлены результаты исследований в соответствии с поставленными задачами.

В приложениях представлены акты внедрения результатов исследований.

Основные результаты исследований отражены в следующих защищаемых научных положениях.

1. Разработана математическая модель переноса тепла в рудном штабеле для определения основных теплофизических параметров, влияющих на эффективность режимов фильтрационного выщелачивания золотосодержащих руд при низких температурах.

Значительная часть золоторудных месторождений страны находится в северных регионах в условиях продолжительной и холодной зимы, в частности и Забайкальский край, в силу своих климатических и геокриологических условий, не благоприятен для ведения круглогодичного КВ. Низкие температуры атмосферного воздуха охлаждают добытую и подготовленную руду, что негативно влияет на процессы кучного выщелачивания, так как отрицательная температура горных пород существенно снижает интенсивность растворения металлов и сменяет фильтрационный режим миграции выщелачивающих растворов на медленный инфильтрационный.

На практике снижение негативного воздействия низких температур горных пород на процесс выщелачивания достигается за счет различных мероприятий, направленных на прогрев рудного штабеля и сохранение в нем тепла. Наиболее технологически простым способом прогрева является подача теплоносителя через скважины по трубам. Однако теплофизическим исследованиям по прогреву рудного штабеля источником внешнего тепла уделено недостаточно внимания а, следовательно, оценка целесообразности прогрева затруднена.

На основе теплофизических экспериментальных исследований по прогреву рудного материала можно разработать теплофизические модели переноса тепла в рудном штабеле, которые позволят прогнозировать эффективность ведения выщелачивания в зависимости от температуры горных пород.

Для теплофизического обоснования прогрева рудного штабеля и сохранения в нем накопленного тепла сконструирован лабораторный стенд, на котором проводились эксперименты.

Лабораторный стенд (рисунок 1) представляет собой цилиндрическую емкость 1 с диаметром 580 мм, высотой 870 мм и общим объемом 0,225 м³. Емкость моделирует область (секцию) в штабеле, расположенную около источника тепла – скважины с перфорированной трубой. В пространстве емкости расположены 2 трубы наружным диаметром 40 мм и внутренним диаметром 34 мм, установленных вертикально и диаметрально противоположных друг другу.

Одна из них 2 расположена в 100 мм от боковой поверхности емкости и имеет перфорацию, через отверстия которой проходит подача теплоносителя – горячего воздуха от теплогенератора. Перфорация выполнена в виде прорезей и отверстий, расположенных равномерно по поверхности трубы. Верхняя часть трубы посредством патрубка соединена с теплогенератором. Вторая труба 3 расположена в противоположной стороне от первой и предназначена для отвода излишек поступившего воздуха, главным образом, с нижних горизонтов установки. Емкость утеплена теплоизоляцией 4 для снижения тепловых потерь и имитации множественности тепловых полей (секций) в штабеле.

Емкость заполняется материалом – рудной массой 5, в ней располагаются температурные датчики 6, размещенные в алюминиевых капсулах. Капсулы предназначены для защиты от физических воздействий при загрузке емкости горной массой и определения непосредственно температуры твердой фракции, а не температуры порового воздуха в руде. Температурные датчики соединены с компьютером, который выводит показания датчиков на экран. Датчики расположены в одной плоскости с трубами. Координатное размещение датчиков показано на схеме установки.

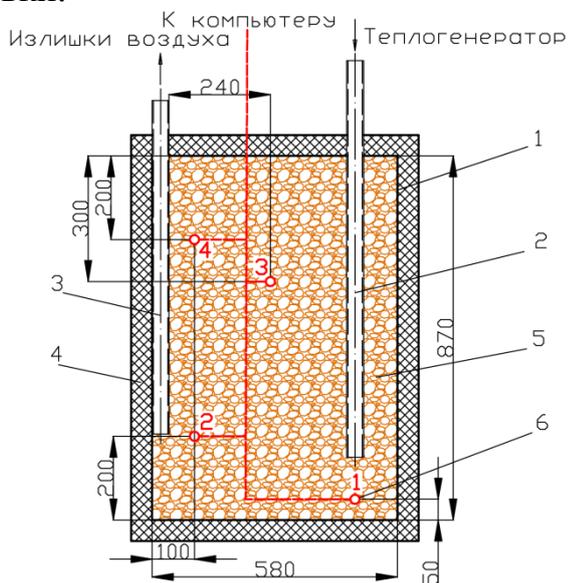


Рисунок 1. – Схема лабораторного стенда для определения теплового режима штабеля КВ

В качестве материала для экспериментов использованы руды Савкинского месторождения, которые перерабатываются ООО «Мангазeya Майнинг» методом КВ. Замерзшая рудная масса с температурой (–21...–19 °С) складировалась в сконструированную установку с размещением в ней датчиков температуры и двух труб. После загрузки емкость утеплялась теплоизоляцией. Затем через перфорированную трубу в емкость подавался горячий воздух (с темпера-

турой для каждого эксперимента, соответственно 50, 150, 300 и 450 °С). При достижении температуры +36... +46 °С на датчике №1 подача воздуха прекращалась. Замеры температуры производились с интервалом 15 минут, начиная с момента подачи воздуха, далее производилось выстаивание ёмкости для установления равномерного теплового поля в горной массе. Повторные замеры производились через сутки. После контрольных замеров производился демонтаж теплоизоляции и охлаждение горной массы до температуры окружающей среды. Через сутки проводился следующий эксперимент.

Для теплофизической оценки рудного штабеля, на основе полученных в ходе экспериментов данных, проведено компьютерное моделирование, которое выполнялось программным комплексом ANSYS Workbench, при создании геометрических моделей рудного штабеля в среде AutoCAD. Компьютерное моделирование позволяет в короткие сроки при минимальных затратах ресурсов выполнить теплофизическую оценку штабеля, на основании которой можно судить об эффективности КВ в условиях низких температур.

Моделирование произведено при условиях: 1) в качестве выщелачиваемых пород выбраны граниты с теплопроводностью $K_T = 2,35 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°С)}$, теплоемкостью $c = 900 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{°С)}$. Характеристики взяты, усреднено, для горных пород гранулометрического класса -20 мм; 2) в качестве основания принята гравийная отсыпка и многослойно уплотненная глина с полимерной пленкой теплопроводностью $K_T = 0,9 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°С)}$, удельной теплоемкостью $c = 880 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{°С)}$; 3) тепловое влияние выщелачивающих растворов в расчете не учитывается – предполагается, что подогрев растворов не осуществляется, тем не менее, сохранены положительные значения температур; 4) теплофизические характеристики подстилающего основание пород постоянны; 5) не учтено тепловое влияние экзотермических реакций. В ходе компьютерного моделирования получены зависимости продолжительности прогрева рудного штабеля от температуры теплоносителя и начальной температуры пород штабеля (рисунок 2).

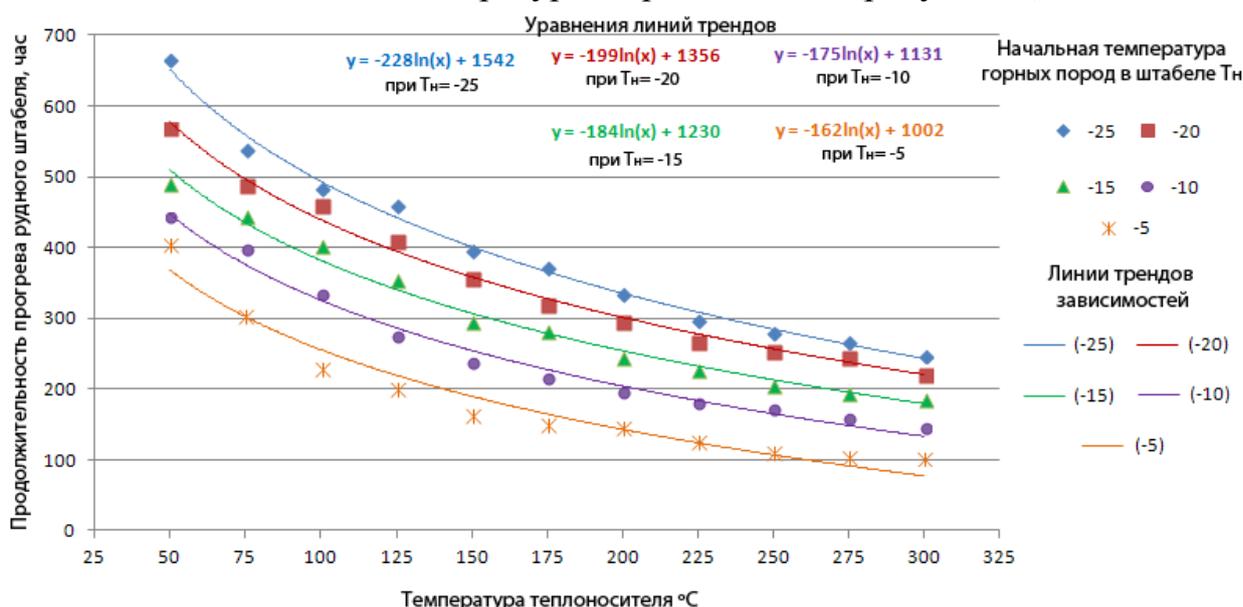


Рисунок 2. – Зависимость продолжительности прогрева рудного штабеля от температуры теплоносителя и начальной температуры пород штабеля

На основании данных экспериментов и моделирования был проведен статистический анализ. По результатам анализа получена проекция изотермы со значением $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ на вертикальную плоскость, проходящую через ось источника тепла. Тренд проекции в неограниченном основании пространстве представляет собой параболическую кривую (рисунок 3).

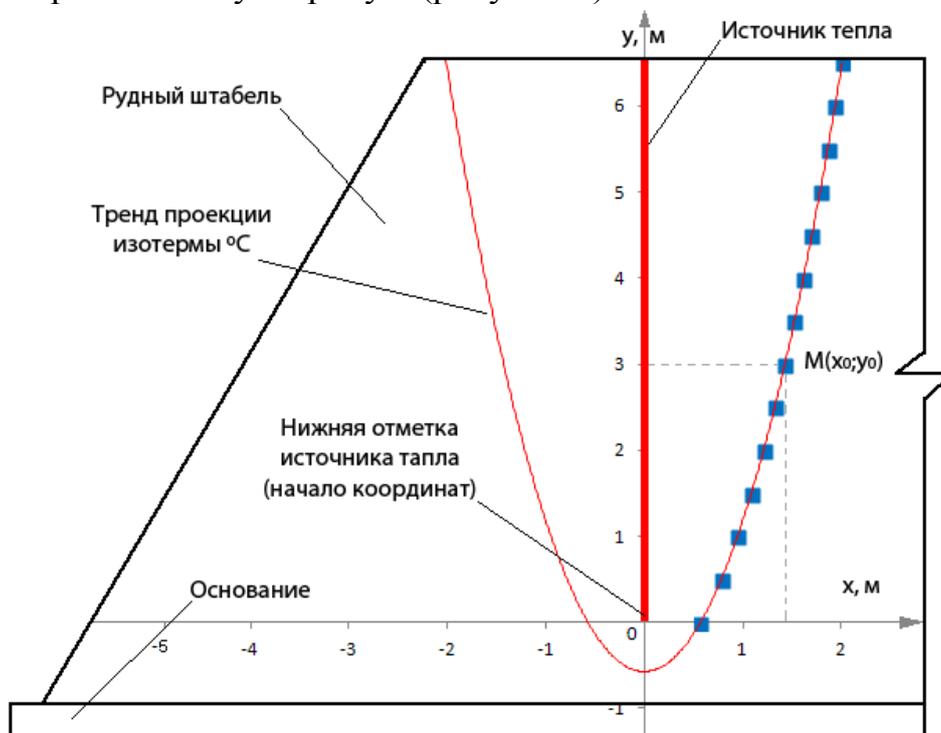


Рисунок 3. – Тренд проекции изотермы $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ при прогреве штабеля источником тепла (температура теплоносителя $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, период 24 часа)

Проекция области прогрева горной массы от источника тепла описывается функцией вида

$$y = a_0x^2 - b, \quad (1)$$

В связи с тем, что значения переменной x в точке $y = 0$ равняется b (равномерное распространение тепла от забоя скважины). Можно определить a_0 как

$$a_0x^2 - b = 0; a_0 = \frac{b}{x^2} = \frac{1}{b} \quad (2)$$

Таким образом, итоговая область прогрева описывается функцией вида

$$y = \frac{1}{b}x^2 - b \quad (3)$$

Значение величины b (расстояние от нижней отметки источника тепла до изотермы $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, значение x в точке $y=0$) эмпирически определено, исходя из переменных: разности температур (Δt°) источника тепла и начальной температуры пород рудного штабеля, продолжительности прогрева (T_{np}), теплопроводности горных пород (K_m) и коэффициента теплоотдачи (K_{mo}) теплоносителя. С использованием данных, полученных в ходе моделирования различных комбинаций влияющих факторов ($K_m, K_{mo}, T_{np}, \Delta t^{\circ}$), проведен математический статистический анализ в программной среде MathCAD, на основании которого получена зависимость величины b от $K_m, K_{mo}, T_{np}, \Delta t^{\circ}$. В общем виде

$$b = K_m \times K_{mo} \times 10^{-4} \times (T_{np} \times \ln \Delta t^\circ)^{0,69}, \quad (4)$$

где: b – параметр распространения тепла, м;

K_m – коэффициент теплопроводности рудного материала, Вт/(м·°С);

K_{mo} – коэффициент теплоотдачи теплоносителя, Вт/(м²·°С);

T_{np} – продолжительность прогрева, час;

Δt° – разность начальной температуры пород рудного штабеля и температуры теплоносителя, °С (для корректного расчета, $\Delta t^\circ > 1$).

Подставляя значение параметра b в формулу (3) и выражая величину x , получим

$$x = \pm \sqrt{K_m \times K_{mo} \times 10^{-4} \times (T_{np} \times \ln \Delta t^\circ)^{0,69} \times (y + K_m \times K_{to} \times 10^{-4} \times (T_{np} \times \ln \Delta t^\circ)^{0,69})}, \quad (5)$$

где: x – расстояние от источника тепла до изотермы 0 °С, в точке y_0 , м;

y – расстояние от нижней отметки источника тепла до точки замера y_0 , м.

Коэффициент достоверности аппроксимации для данной формулы составляет 0,95. Таким образом, область распространения тепла в вертикальной плоскости от источника тепла представляет собой параболу, рассчитанную по эмпирической формуле (5), по которой можно определить эффективный режим фильтрационного выщелачивания золота в период низких температур.

На основании расчета значения b предложена методика определения рациональных конструктивных параметров рудного штабеля, таких как его высота, расстояние между источниками тепла и т.д.

2. Круглогодичное кучное выщелачивание золотосодержащих руд достигается путем первоначального укрытия рудного штабеля теплозащитным покрытием с последующей подачей в него теплоносителя от внешнего источника.

Развиваемая позиция по ведению круглогодичного КВ золота показана на примере технических решений – патентно-защищенных поточных линий для круглогодичного КВ (патенты № 2493363 и № 2493364). Рассмотрим одну из них.

Техническое решение (рисунок 4) включает последовательно установленные друг за другом рудный штабель 1 (сформированный из предварительно дробленной руды крупностью 20 мм), систему дренажа 2, железобетонную кювету 3, борт кюветы 4, комплекс для приготовления и доукрепления выщелачивающего раствора 5, трубопровод 6, насос для подачи выщелачивающего раствора 7, устройство для подогрева раствора 8, систему орошения 9, укрытую теплозащитным покрытием 10, приемное устройство 11 для насыщенных растворов, состоящее из двух последовательно друг за другом модулей, первого 12 на входе, соединенного с решетом 13, и второго 14, соединенного с насосом 15 и трубопроводом 16, и имеющего нагревательные элементы 17 с отдельным источником питания 18, комплекс устройств для сбора и переработки насыщенных растворов 19, размещенный в отдельном утепленном здании, теплогенератор 20, выход которого соединен через трубопроводную сеть 21 непосредственно с неподвижными патрубками 22, закрепленными сверху съемных вертикальных и наклонных перфорированных труб 23, снабженных закручивающимися крышками 24 и датчиками 25, соединенными гибкой связью 26 с уст-

ройством 27 контроля и автоматического регулирования температуры в объеме штабеля.

В период с положительными температурами на железобетонную кювету с дренажной системой производится отсыпка руды первого участка штабеля с размещением в нем разъемных перфорированных труб. Затем после формирования первого участка штабеля устанавливается второй участок разборных труб, на каждом участке находится датчик температуры. Аналогично формируются последующие участки штабеля, на последних перфорированных трубах закрепляются патрубки для размещения гибкой связи датчиков с устройством контроля температуры внутри штабеля. Далее на сформированную поверхность штабеля укладывается система орошения. Выщелачивающий раствор из нее поступает на рудный штабель и после фильтрации насыщенный раствор по дренажной системе поступает в утепленную приемную емкость и с помощью насоса подается в комплекс сорбции-десорбции.

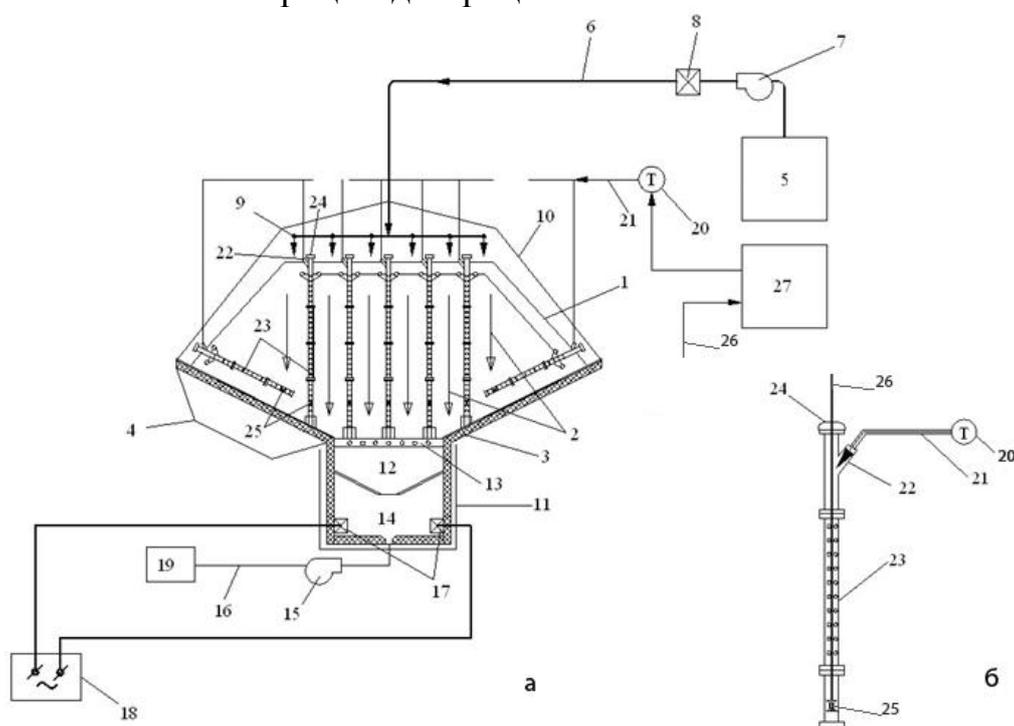


Рисунок 4. – Схема поточной линии для круглогодичного выщелачивания золота: а – общий вид, б – устройство перфорированных труб (патент № 2493364)

Для работы в холодный период времени система орошения совместно со штабелем укрывается теплозащитным покрытием (причем толщина теплоизоляции определяется глубиной сезонного промерзания приповерхностного слоя). От теплогенератора по перфорированным трубам в рудный штабель поступает теплоноситель, и по достижении заданной температуры горных пород, сигнал от датчиков поступает на устройство контроля и автоматического регулирования температуры, отключающее подачу теплоносителя. Перед подачей выщелачивающего раствора к оросительной системе его пропускают через устройство для подогрева раствора. Насыщенный раствор направляется по дренажной системе в устройство для приема насыщенных растворов, в котором поддерживается положительная температура с помощью нагревательных элементов.

Перед подачей выщелачивающего раствора к оросительной системе его пропускают через устройство для подогрева раствора. Насыщенный раствор направляется по дренажной системе в устройство для приема насыщенных растворов, в котором поддерживается положительная температура с помощью нагревательных элементов. После подогрева в нижнем модуле раствор направляется насосом по трубопроводу в комплекс устройств для сбора и переработки насыщенных растворов, расположенный в отдельном утепленном здании.

Технологические преимущества поточной линии:

- ведение выщелачивания штабеля в требуемом фильтрационном режиме;
- управление температурным режимом штабеля в холодный период времени;
- повышение технологических показателей выщелачивания золота;
- повышение экологической безопасности за счет минимизации утечек продуктивных растворов;
- проведение размораживания мерзлых слоев руды в штабеле.

Для теплофизического обоснования ведения круглогодичного кучного выщелачивания с помощью патентно-защищенной поточной линии проведена оценка теплового режима штабеля с помощью разработанной компьютерной модели. Моделированию подвергались варианты прогрева штабеля с различной температурой теплоносителя 50, 150, 300 и 450 °С (в соответствии с проведенными экспериментами). Компьютерным моделированием установлены рациональные конструктивные параметры штабеля для ведения круглогодичного выщелачивания руд.

Геометрическая модель штабеля – усеченная пирамида с размерами верхнего и нижнего основания соответственно 50×100 и 70×120 м, высотой 7 м, углом откоса ~ 35°, объемом 43,7 тыс. м³ с дополнительными элементами – внешними источниками тепла, выполненными в виде перфорированных труб длиной 5 м, диаметром 165 мм. Трубы расположены по сети 6,4×6,4 м в количестве 144 штуки. Мощность основания 0,6 м (железобетонная кювета 0,15 м и подстилающая отсыпка 0,45 м), мощность теплозащитного покрытия 0,1 м.

Тепловые характеристики моделирования: температура атмосферного воздуха составляет –30 °С (минимальные температуры декабря-января для Юго-Восточного Забайкалья); начальная температура пород штабеля –20 °С (данные экспериментов); в качестве теплоносителя выступает нагретый воздух, температура 50–450 °С; температура подстилающих основание пород –3 °С (температура островной криолитозоны Савкинского месторождения). Графические результаты моделирования прогрева штабеля теплоносителем с температурой 450 °С представлены на рисунке 5.

После 5 суток (рисунок 5 а) с момента начала подачи теплоносителя идет интенсивный прогрев околотрубного пространства, часть тепла под действием термогравитационной конвекции скапливается в верхней части рудного штабеля под слоем теплоизоляции, распространяясь в радиальном направлении от труб. Радиус прогретой области с положительными температурами колеблется от 2 м (внизу) до 2,5 м (вверху).

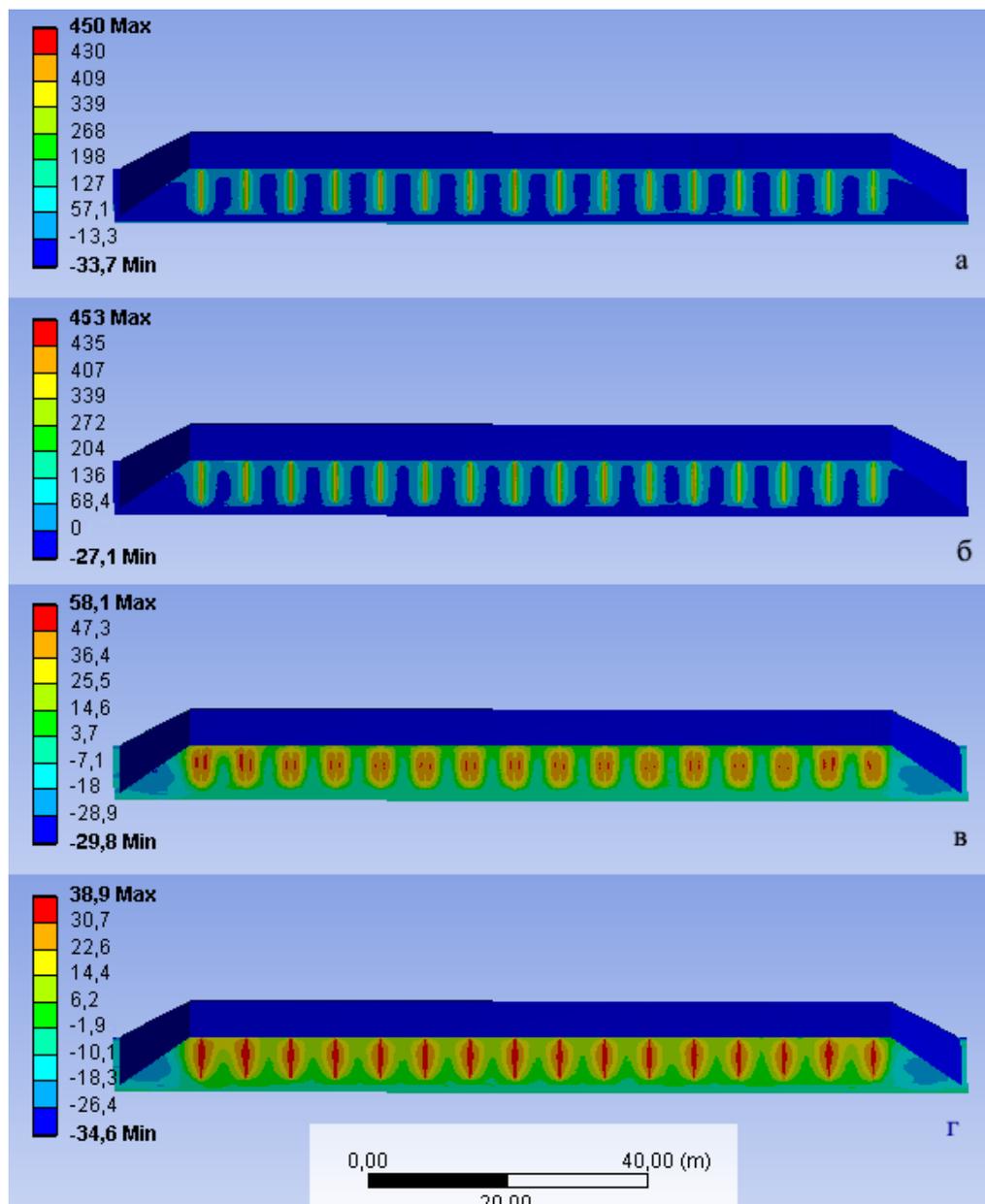


Рисунок 5. – Моделирование теплового состояния штабеля при его прогреве (а – после 5 дней, б – после 10 дней, в – после 15 дней, г – после 20 дней).

После 10 дней (рисунок 5 б) подачи теплоносителя объем прогретой рудной массы составляет около 50 % от общего объема штабеля, поэтому температура теплоносителя снижена до рабочей температуры 35 °С, остальной объем прогревается посредством теплопереноса. На данном этапе прослеживаются параболические области прогрева околотрубного пространства.

После 15 дней (рисунок 5 в) с начала подачи теплоносителя основная часть штабеля прогрета до положительных температур. Высокие температуры (выше 60 °С) посредством теплообмена распределились по основному объему рудного штабеля. В этот период уже возможна подача выщелачивающих растворов, так они будут способствовать теплопереносу на нижние горизонты.

После 20 дней (рисунок 5 г) подачи теплоносителя 90 % штабеля полностью прогрето, отрицательные температуры локализуются в откосных частях, где отсутствует прогрев. Теплоноситель с температурой 35 °С равномерно про-

гревает рудный штабель, поддерживая в нем положительные температуры. Дальнейшие изменения теплового режима штабеля во времени практически отсутствуют – установилось тепловое равновесие.

Таким образом, после 15 дней с начала прогрева можно осуществлять подачу растворов, так как достигается допустимый температурный режим для выщелачивания золота.

Для предварительной экспресс-оценки экономической эффективности внедрения круглогодичного КВ разработана методика на основе определения суммарного коэффициента условий – K_y (включающего коэффициенты: технологический, дифференциальной горной ренты, геокриологический, климатический и коэффициент прочих условий), и сравнения его с фактической рентабельностью (R) предприятия. Суммарный коэффициент условий для Савкинского месторождения равен $K_y = 1,31$, критический коэффициент условий I рода равен $K_{y_{кр}}^{R^I} = (1 + R) = 1,28$, так как $K_y > K_{y_{кр}}^{R^I}$ внедрение круглогодичного КВ понизит рентабельность производства по сравнению с сезонным режимом работы, однако сохранит ее на приемлемом уровне.

Эффективность функционирования патентно-защищенной поточной линии подтверждается сравнительной технико-экономической оценкой круглогодичного и сезонного режимов работы установок КВ на Савкинском месторождении (таблица 1). В качестве экономического критерия при этой оценке использован чистый дисконтированный доход (ЧДД, NPV).

Таблица 1. – Сравнительная технико-экономическая оценка сезонного и круглогодичного КВ на Савкинском месторождении (в ценах начала 2015 г)

Показатели	Ед. измер.	Способ отработки	
		сезонный	круглогодичный
Годовая производительность по руде	тыс. т.	300	460
Содержание золота	г/т	2,3	
Извлечение золота	%	86	
Капитальные вложения	млн. руб.	1360	1636
Выручка	млн. руб.	1305	2002
Валовая себестоимость	млн. руб.	964	1599
Себестоимость 1 г золота	руб.	1625	1757
Чистая прибыль	млн. руб.	269	318
Рентабельность R	%	27,9	20,0
ЧДД (NPV)	млн. руб.	123,6	657,5

Значения капитальных затрат при круглогодичном кучном выщелачивании выросли на 276 млн. руб. за счет приобретения дополнительного оборудования (теплогенератора, дополнительных трубопроводов, теплоизолирующего экрана и др.), обустройства специальных площадок и увеличения горно-капитальных работ. Наблюдается увеличение себестоимости 1 г золота, что обусловлено дополнительными затратами на поддержание положительных температур в рудном штабеле, однако часть этих затрат нивелируется снижением доли постоянных издержек. Ожидаемый ЧДД круглогодичного кучного вы-

щелачивания превосходит ожидаемый ЧДД сезонного КВ, изменения составляют 534 млн. руб. Таким образом, подтверждается экономическая эффективность ведения круглогодичного КВ золотосодержащих руд в условия низких температур на Савкинском месторождении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационное исследование является завершенной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований, решена важная научно-техническая задача – повышение эффективности технологии круглогодичного КВ золотосодержащих руд в условиях низких температур на основе управления тепловым режимом в штабеле, имеющая существенное хозяйственное значение для развития золотодобычи.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. Выполнен системный анализ отечественного, зарубежного опыта и патентно-защищенных технических решений круглогодичного КВ золота. Выявлено, что современным способом повышения эффективности технологии круглогодичного КВ, является способ предварительного прогрева рудного штабеля источником внешнего тепла. Показано, что в климатическом и геокриологическом отношении Забайкальский край не благоприятен для ведения круглогодичного КВ золота, однако существует возможность регулирования теплового режима штабеля при КВ руд в условиях низких температур.

2. Проведены теплофизические экспериментальные исследования по прогреву рудного материала на примере Савкинского месторождения при низких температурах горных пород с целью разработки математической модели переноса тепла в штабеле.

3. Установлена в ходе компьютерного моделирования закономерность изменения продолжительности прогрева рудного материала от температуры теплоносителя, позволяющая прогнозировать теплофизический режим штабеля и эффективность ведения выщелачивания в зависимости от начальной температуры горных пород без проведения натурного эксперимента.

4. Разработана математическая модель распространения теплового поля в вертикальной плоскости от источника внешнего тепла, позволяющая определять теплофизические параметры фильтрационного режима круглогодичного КВ золота.

5. Дано теоретическое обоснование ведения круглогодичного КВ на основе разработанных моделей теплового режима штабеля, в различных климатических и геокриологических обстановках.

6. Обоснована экономическая целесообразность круглогодичного кучного выщелачивания золота с предварительным прогревом рудного штабеля источником внешнего тепла в период низких температур с использованием методики учета суммарного коэффициента условий.

7. Проведена сравнительная технико-экономическая оценка сезонного и круглогодичного КВ золотосодержащих руд Савкинского месторождения. Кри-

териум оценки являлся ЧДД, этот показатель для круглогодичного КВ превысил ЧДД сезонного КВ на 534 млн. руб.

8. Обоснованы и установлены рациональные конструктивные параметры рудного штабеля как одного из важнейших элементов геосистемы КВ золото-содержащих руд, предложена методика их расчета для ведения круглогодичного технологического процесса.

9. Разработаны новые поточные линии для круглогодичного КВ золото-содержащих руд с применением подогрева рудного штабеля источником внешнего тепла.

10. Основные результаты исследования внедрены в инжиниринговую деятельность Забайкальского филиала ООО «ТОМС инжиниринг» в г. Чита при разработке проектной документации «Промышленная отработка золоторудного месторождения «Савкинское». Расширение производства» и в учебный процесс ФБГОУ ВПО «Забайкальский государственный университет» при подготовке специалистов по направлению 130400.65 «Горное дело» по дисциплинам: основы металлургии, экономика и менеджмент горного производства.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Мязин В.П. / Перспективы кучного выщелачивания золота в условиях криолитозоны Забайкалья / В.П. Мязин, Д.М. Шестернев, Е.Н. Шемякина, А.Е. Баянов // **Горный информационно-аналитический бюллетень № 6.** – М.: «Горная книга», 2011. – с. 138-147.

2. Баянов А.Е. Совершенствование технологии кучного выщелачивания золота в условиях криолитозоны Забайкалья / А.Е. Баянов // **Вестник ЗабГУ № 9 (88).** – Чита: ЗабГУ, 2012. – с. 13-19.

3. Мязин В.П. / Техническое решение для реализации технологии круглогодичного кучного выщелачивания в условиях криолитозоны Забайкалья / В.П. Мязин, Д.М. Шестернев, А.Е. Баянов // **Горный информационно-аналитический бюллетень № 6.** – М.: «Горная книга», 2013. – с. 101-108.

4. Баянов А.Е. Критерии технико-экономической оценки эффективности продления сезона КВ в условиях Забайкалья / А.Е. Баянов, В.П. Мязин // **Вестник ЗабГУ № 5 (96).** – Чита: ЗабГУ, 2013. – с. 19-26.

5. Шестернев Д.М. / Кучное выщелачивание золота в криолитозоне России / Д.М. Шестернев, В.П. Мязин, А.Е. Баянов // **Горный журнал № 1(2210).** – М.: «Руды и металлы», 2015. – с. 49-54.

6. **Пат. № 2493363** Российская Федерация, МПК E21B43/28. Поточная линия для круглогодичного кучного выщелачивания благородных металлов в криолитозоне / Опарин В.Н., Тапсиев А.П., Секисов А.Г., Кондратьев С.А., Усков В.А., Артеминко Ю.В., Ростовцев В.И., Мязин В.П., Шестернев Д.М., Резник Ю.Н., Шумилова Л.В., Шемякина Е.Н., Баянов А.Е.; патентообладатель Учреждение Российской академии наук ИГД СО РАН. - № 2012100461/03, заявл. 10.01.2012; опубл. 20.09.2013.

7. **Пат. № 2493364** Российская Федерация, МПК E21B43/28. Поточная линия для круглогодичного кучного выщелачивания металлов из руд / Мязин В.П., Шестернев Д.М., Секисов А.Г., Тапсиев А.П., Баянов А.Е., Субботин

М.Ю., Шекиладзе В.Т., Поляков О.А., Карасев К.И.; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Забайкальский государственный университет» (ФГБОУ ВПО «ЗабГУ») № 2012105846/03, заявл. 17.02.2012; опубл. 20.09.2013.

8. Баянов А.Е. К комплексной оценке золотосодержащих месторождений и техногенного сырья // Приоритетные направления развития науки и технологий: доклады VIII Всероссийской научн.-техн. конф.; под общ. ред. Э.М. Соколова. – Тула: «Инновационные технологии», 2010. – с. 27-30.

9. Мязин В.П. Особенности круглогодичного кучного выщелачивания природного и техногенного золотосодержащего сырья Забайкалья / В.П. Мязин, А.Е. Баянов, Е.Н. Шемякина // Новые технологии обогащения и комплексной переработки труднообогатимого природного и техногенного минерального сырья (Плаксинские чтения 2011): Материалы междунар. совещ. Верхняя Пышма, 19-24 сент. 2011 г. – Екатеринбург: «Форт Диалог-Исеть», 2011. – с. 421-424.

10. Баянов А.Е. Обзор методов, применяемых для продления сезона, кучного выщелачивания в условиях отрицательных температур // Кулагинские чтения: XI Междунар. научн.-практич. конф. – Чита: ЗабГУ, 2011. – Ч. III. – с. 65-67.

11. Баянов А.Е. Методы, применяемые для продления сезона кучного выщелачивания, и их экономическая эффективность // 8 Междунар. молодежн. научн. школа «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых». 14-18 нояб. 2011. – М.: ИПКОН РАН, 2011. – с. 122-125.

12. Баянов А.Е. Группировка мероприятий и инженерных идей для эффективного кучного выщелачивания в условиях отрицательных температур // Кулагинские чтения: XII Междунар. научн.-практич. конф. – Чита: ЗабГУ, 2012. – Ч. VI. – с. 33-35.

13. Баянов А.Е. Зарубежная практика использования кучного выщелачивания в условиях отрицательных температур // 8 Междунар. молодежн. научн. школа «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых». Том 2. 19-23 нояб. 2012. – М.: ИПКОН РАН, 2012. – с. 146-149.

14. Баянов А.Е. Исследование теплового состояния штабеля при кучном выщелачивании в суровых климатических условиях // Кулагинские чтения: XIII Междунар. научн.-практич. конф. – Чита: ЗабГУ.

Лицензия ЛР № 020525 от 02.06.97
Подписано в печать 10.04.2015г Формат 60x84 1/16
Усл.печ.л. 1,0 Тираж 100 экз. Заказ № 25

Забайкальский государственный университет
ул. Александрo-Заводская, 30, г. Чита, 672039
РИК ЗабГУ