

На правах рукописи



ШИПНИГОВ Антон Андреевич

**КУЧНОЕ СЕРНОКИСЛОТНО-ТИОЦИАНАТНОЕ
ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ ОКИСЛЕННЫХ ЗОЛОТОУРАНОВЫХ РУД
С ОДНОВРЕМЕННЫМ ИЗВЛЕЧЕНИЕМ ЗОЛОТА И УРАНА**

Специальность 2.6.2. Metallургия черных, цветных и редких металлов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иркутск – 2026

Работа выполнена
в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении
высшего образования
«Иркутский национальный исследовательский технический университет»

Научный руководитель:

Епифоров Александр Владимирович
кандидат технических наук

Официальные оппоненты:

Белоусова Наталья Викторовна
доктор химических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный
университет», заведующая кафедрой
металлургии цветных металлов
(г. Красноярск)

Бодуэн Анна Ярославовна
кандидат технических наук, доцент,
ООО «Удоканская медь», операционная
дирекция, служба главного технолога,
заместитель главного технолога по
развитию производства (г. Чита)

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
горный университет императрицы
Екатерины II» (г. Санкт-Петербург).

Защита состоится «24» декабря 2026 г. в 12⁰⁰ на заседании диссертационного совета 24.2.307.01 в ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, корпус «К», конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» по адресу <http://www.istu.edu>.

Автореферат разослан «02» ноября 2026 г.

Отзывы на автореферат (в 2-х экземплярах, заверенные печатью организации) просьба выслать по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ИРНТУ; ученому секретарю диссертационного совета 24.2.307.01 Вулых Н.В.

E-mail: vulix2011@yandex.ru
Тел./факс: (3952) 40-51-17

Ученый секретарь диссертационного
совета, к.т.н., доцент



Н.В. Вулых

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В современных условиях истощения запасов богатых и легкообогатимых руд благородных и редких металлов вовлечение в отработку забалансовых, техногенных и комплексных месторождений становится стратегической задачей горнодобывающей отрасли. Особое место среди такого сырья занимают смешанные золотоурановые руды. Традиционные технологии переработки таких руд зачастую направлены на извлечение лишь одного компонента, что приводит к безвозвратным потерям второго и снижению общей рентабельности производства.

Стандартные схемы, основанные на цианировании золота и серноокислотном выщелачивании урана, не всегда применимы к комплексному сырью из-за их высокой стоимости, технологической несовместимости (разный pH среды) и значительной экологической нагрузки. Применение цианидов требует создания сложных систем обезвреживания и исключает возможность одновременного извлечения урана в одной технологической стадии из-за необходимости поддержания высоких значений pH.

Использование кислых тиоцианатных растворов открывает новые перспективы для создания единой технологии совместного извлечения золота и урана и способствует преодолению недостатков традиционной схемы переработки золотоурановых руд. Тиоцианат-ион является эффективным альтернативным реагентом, способным в кислой среде ($\text{pH} < 3$) образовывать прочные комплексы с золотом. В качестве окислителя в данном случае могут служить ионы железа (III), присутствующие в растворе серноокислотного выщелачивания, при котором железо переходит в раствор. Это создает условия для термодинамической совместимости процессов выщелачивания золота и урана в рамках одного цикла.

Метод кучного выщелачивания является наиболее экономически оправданным для переработки бедных и окисленных руд благодаря низким капитальным и эксплуатационным затратам. Однако его применение для золотоуранового сырья сдерживается явлениями пассивации поверхности металлов и недостаточно изученным механизмом взаимодействия реагентов в условиях длительного орошения штабеля.

Актуальность работы подтверждается также ее соответствием приоритетными направлениями развития науки, технологий и техники РФ и отвечает Стратегии развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 года (Распоряжение Правительства РФ от 22.12.2018 № 2914-р) в части повышения эффективности освоения известных месторождений путем внедрения современных технологий переработки, обогащения и комплексного извлечения полезных ископаемых.

Цель работы

Физико-химическое обоснование и разработка принципиальной технологической схемы переработки окисленной золотоурановой руды методом кучного выщелачивания с использованием серноокислых тиоцианатных растворов, обеспечивающей одновременный перевод золота и урана в единый продуктивный раствор для их последующего раздельного извлечения.

Задачи работы:

- анализ современного состояния технологий извлечения золота и урана из рудного сырья;
- проведение термодинамических расчетов и физико-химическое обоснование процессов выщелачивания золота тиоцианатными растворами в присутствии комплексных соединений Fe(III) и серноокислотного растворения урана;

- изучение вещественного состава и технологических свойств исследуемой золотоурановой руды;
- разработка методики совместного выщелачивания золота и урана сернокислыми тиоцианатными растворами и определения оптимальных параметров агитационного выщелачивания;
- проведение укрупненно-лабораторных испытаний по совместному кучному выщелачиванию золота и урана сернокислыми тиоцианатными растворами;
- разработка принципиальной технологической схемы для переработки золотоурановых руд методом кучного выщелачивания сернокислыми тиоцианатными растворами;
- выполнение технико-экономической оценки предлагаемых технологических решений.

Методы исследования

При выполнении работы использован комплекс современных аналитических методов: пробирный анализ (для определения содержания золота в твердой фазе), атомно-абсорбционная спектрометрия (ААС) и масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) (для анализа жидких и твердых фаз), рентгенофазовый (РФА) и дифрактометрический анализы (для изучения минерального и элементного состава руды), а также титриметрические методы анализа технологических растворов для определения остаточных концентраций серной кислоты и ионов Fe(II) и Fe(III).

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждается использованием аттестованных физических (инструментальных) и физико-химических методов анализа, применением современных средств измерений, статистической обработки результатов исследований, сходимостью результатов лабораторных и укрупненно-лабораторных исследований.

Научная новизна

Доказана возможность совместного одностадийного сернокислотно-тиоцианатного выщелачивания золота и урана из окисленных золотоурановых руд с переводом их в единый продуктивный раствор с возможной последующей разделной сорбцией.

Доказана возможность растворения простого тиоцианата золота (I) AuSCN в присутствии свободного тиоцианат-иона (SCN^-), ионов Fe(III) и тиоцианатных комплексов железа ($[\text{FeSCN}]^{2+}$, $[\text{Fe}(\text{SCN})_2]^+$, $\text{Fe}(\text{SCN})_3$, $[\text{Fe}(\text{SCN})_4]^-$) в температурном диапазоне 298–358 К для минимизации потерь золота.

Теоретически доказано преимущественное образование в многокомпонентной системе «уран – сульфат – тиоцианат» уранил-сульфатов над образованием сульфатов и тиоцианатов урана.

Практическая значимость

Разработан одностадийный способ совместного сернокислотно-тиоцианатного выщелачивания золота и урана из комплексного сырья, позволяющий упростить технологическую схему и снизить эксплуатационные затраты (патент РФ на изобретение № 2791169). Установлены оптимальные параметры $\text{pH} < 3$, концентрация серной кислоты 5–50 г/дм³, концентрация SCN^- – 0,1– 3,0 г/дм³, концентрация ионов Fe(III) – 1–5 г/дм³, температура процесса 40–95 °С. При данных условиях извлечение золота составляет 86–90 %, а попутное извлечение урана – 68–70 %.

Оптимизированы расходы реагентов за счет строгого контроля мольных и массовых соотношений ионов $\text{Fe}^{3+}/\text{SCN}^-$ и $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{SCN}^-$, что позволяет оптимизировать переработку золотоурановых руд (патент РФ на изобретение № 2811640).

Рекомендованы принципиальная технологическая схема и оборудование для совместного одностадийного выщелачивания золота и урана из окисленной золотоурановой руды с последующей раздельной сорбцией ценных компонентов: золота – на активированный уголь, урана – на ионообменную смолу. При оптимальных параметрах ($\text{pH} < 3$, концентрация серной кислоты $5\text{--}10\text{ г/дм}^3$, концентрация SCN^- – $0,5\text{ г/дм}^3$, концентрация ионов Fe(III) – $1\text{--}3\text{ г/дм}^3$, температура процесса $25\text{ }^\circ\text{C}$). При данных условиях извлечение золота составляет $86\text{--}90\%$, а попутное извлечение урана – $54,8\%$.

Полученные в работе теоретические и экспериментальные результаты представляют научно-практический интерес для промышленного производства (имеется акт укрупненно-лабораторных испытаний в АО «Иргиредмет»).

Оценена экономическая эффективность предложенных технологических решений по совместному выщелачиванию золота и урана: себестоимость переработки 1 т руды составляет 741 руб. (без учета затрат на стадии рудоподготовки, отсыпки рудного штабеля и переработки насыщенных сорбентов).

Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» при подготовке обучающихся по направлению «Металлургия».

Положения, выносимые на защиту

1. Термодинамические закономерности совместного выщелачивания золота и урана в сернокислых тиоцианатных системах, обосновывающие принципиальную возможность одновременного извлечения металлов и высокую устойчивость их растворенных форм в едином продуктивном растворе.

2. Оптимальные параметры совместного агитационного выщелачивания золота и урана, обеспечивающие высокую эффективность извлечения металлов при температуре – $65\text{ }^\circ\text{C}$, концентрации, г/дм^3 : H_2SO_4 – $10\text{--}15$, SCN^- – $0,5$ и Fe(III) $1\text{--}3\text{ г/дм}^3$. Продолжительность выщелачивания золота – $15\text{--}30\text{ мин}$, урана – 6 ч , поддержание окислительно-восстановительного потенциала на уровне $0,49\text{--}0,51\text{ В}$ достигается введением диоксида марганца в качестве окислителя.

3. Результаты укрупненно-лабораторных испытаний по совместному кучному выщелачиванию золота и урана из окисленной золотоурановой руды сернокислыми тиоцианатными растворами, подтверждающие, что ценные компоненты переходят в единый продуктивный раствор с извлечением за 90 сут на уровне 90% (для золота) и 50% (для урана), из которого далее осуществляется их раздельное извлечение: золота – на активированный уголь, а урана – на ионообменную смолу.

4. Принципиальная технологическая схема совместного выщелачивания золота и урана по технологии кучного выщелачивания.

5. Технико-экономическая оценка предлагаемых технологических решений.

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач исследований, выполнении экспериментов по агитационному и кучному выщелачиванию золота и урана с одновременным переводом их в раствор, проведении теоретических расчетов физико-химических закономерностей совместного выщелачивания металлов из окисленной золотоурановой руды, а также в анализе и обобщении полученных результатов.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы обсуждались на XI Междунар. научн.-практич. конф. ЦНИГРИ «Новые методы оценки и прогноза месторождений стратегических видов минерального сырья» (г. Москва, $12\text{--}15\text{ апреля } 2022\text{ г.}$); Междунар. совещании «Плаксинские чтения – 2022 » (г.

Владивосток, 4–7 октября 2022 г.); Междунар. совещании «Плаксинские чтения – 2023» (г. Москва, 3–6 октября 2023 г.); Междунар. конф. «World Gold Conference – 2023» (г. Шэньян, Китай, 4–7 сентября 2023 г.); Всерос. науч.-практ. конф. «Золото. Полиметаллы. XXI век: устойчивое развитие» (г. Челябинск, 02–03 марта 2022 г.); XXVII Междунар. науч.-техн. конф. «Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья» (г. Екатеринбург, 07–08 апреля 2022 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 17 печатных трудов, в том числе 3 статьи в рецензируемых научных журналах из Перечня изданий, рекомендованных ВАК РФ (1 издание индексируется международной наукометрической базой данных Scopus); имеются 2 патента РФ на изобретения, а также работы в сборниках научных трудов и материалах Международных и Всероссийских научно-практических конференций.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 120 наименований. Работа изложена на 139 страницах машинописного текста, включая 32 таблицы и 35 рисунков; имеется 5 приложений.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю, к.т.н. Епифорову Александру Владимировичу, коллективу лаборатории металлургии АО «Иргиредмет», заведующей кафедрой металлургии цветных металлов ИРНИТУ, д.т.н., профессору Немчиновой Нине Владимировне и всему профессорско-преподавательскому составу кафедры металлургии цветных металлов ИРНИТУ за помощь при выполнении диссертационной работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулирована цель работы, ее актуальность, научная новизна и практическая значимость.

В главе 1 представлен аналитический обзор современного состояния технологий извлечения золота и урана из рудного сырья. Показано, что традиционные схемы переработки комплексных золотоурановых руд основаны на сочетании сернокислотного выщелачивания урана ($\text{pH} < 3$) и щелочного цианирования золота ($\text{pH} 10,5\text{--}11,5$). При этом установлено, что существенным недостатком таких схем является технологическая несовместимость реагентных сред, требующая многостадийной промывки и нейтрализации хвостов выщелачивания, что неизбежно ведет к росту капитальных и операционных затрат.

Сравнительный анализ нецианидных растворителей золота, способных успешно работать в кислых средах (хлориды, тиосульфаты, тиомочевина, тиоцианаты), показал, что наиболее перспективным реагентом для совместного извлечения металлов является тиоцианат-ион (SCN^-). Тиоцианатная система обеспечивает высокую термодинамическую стабильность в кислых средах комплекса $[\text{Au}(\text{SCN})_4]^-$ (константа устойчивости $\lg \beta = 43,9$), а также достаточную устойчивость комплекса $[\text{Au}(\text{SCN})_2]^-$ ($\lg \beta = 19,2$) и полностью совместима с сернокислотным режимом выщелачивания урана при $\text{pH} < 3$.

На основании анализа мирового опыта применения чанового, подземного и кучного выщелачивания золото- и урансодержащих руд наиболее подходящим методом для переработки бедных и забалансовых руд является кучное выщелачивание (КВ).

На основании литературного обзора сформулирована и обоснована необходимость формирования единого гидрометаллургического цикла совместного кучного выщелачивания золота и урана из золотоурановых руд сернокислотными тиоцианатными растворами, позволяющего одновременно извлекать золото и уран в

единый продуктивный раствор с последующим селективным извлечением металлов путем раздельной сорбции золота на активированный уголь и урана на ионообменную смолу, что повысит рентабельность освоения золотоурановых месторождений.

Глава 2 посвящена термодинамическим расчетам изучаемых гидрометаллургических процессов. Методом термодинамических циклов рассчитаны значения изменения энергии Гиббса (ΔG_p^0) химических реакций растворения золота в интервале температур от 298 до 358 К. Известно, что в присутствии тиоцианат-ионов (в качестве растворителя) реальный окислительно-восстановительный потенциал снижается до 0,69 В для комплекса $[\text{Au}(\text{SCN})_2]^-$ и до 0,66 В для комплекса $[\text{Au}(\text{SCN})_4]^-$. Окислителем золота в данном случае могут являться ионы Fe(III) с потенциалом пары $E_{\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}}^0 = 0,77$ В. При этом расчетами установлено, что наиболее вероятным механизмом растворения является комплексообразование с переходом золота в форму $[\text{Au}(\text{SCN})_4]^-$.

На рисунках 1 и 2 представлены результаты расчета ΔG_p^0 реакций растворения металлического золота с образованием $[\text{Au}(\text{SCN})_2]^-$ и $[\text{Au}(\text{SCN})_4]^-$.

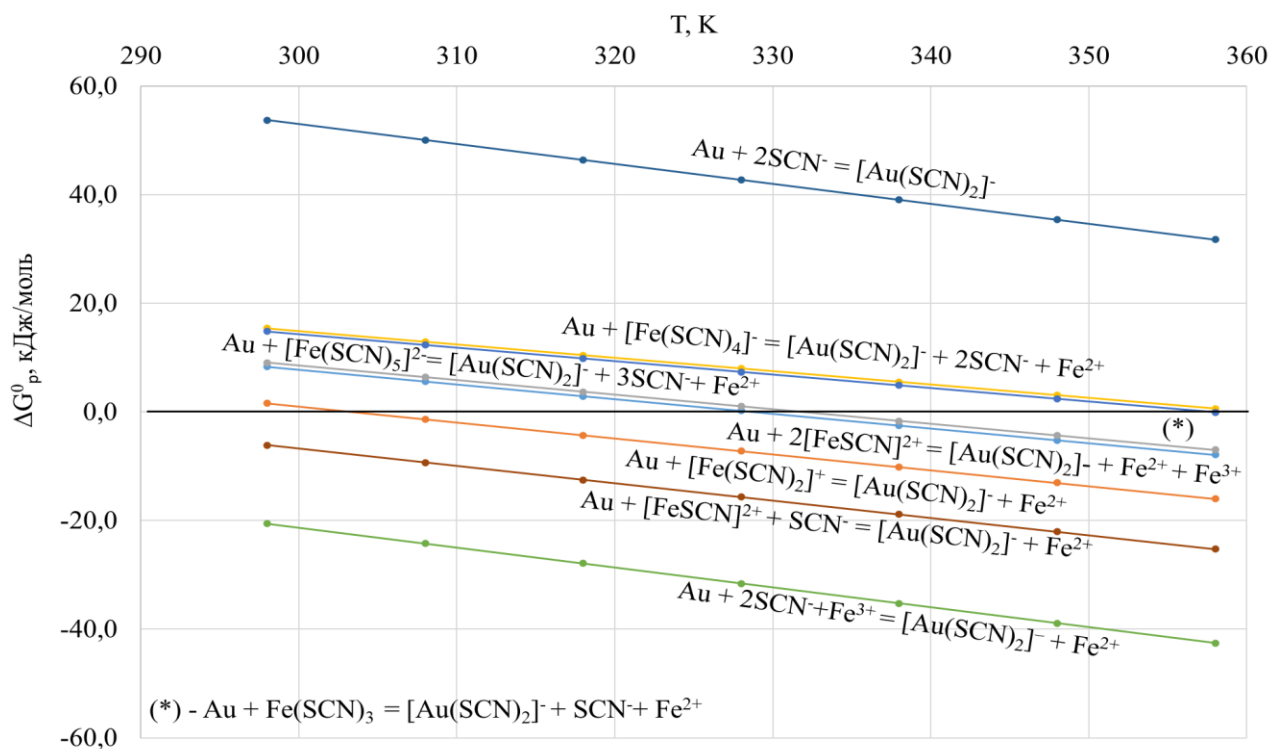


Рисунок 1 – Изменение энергии Гиббса реакций образования $[\text{Au}(\text{SCN})_2]^-$ при различных температурах

Исходя из данных на рисунке 1, видно, что с повышением температуры увеличивается термодинамическая вероятность образования $[\text{Au}(\text{SCN})_2]^-$ и $[\text{Au}(\text{SCN})_4]^-$. Превалирующими будут реакции со свободным тиоцианат-ионом, ионом Fe(III), а также с комплексами $[\text{FeSCN}]^{2+}$ и $[\text{Fe}(\text{SCN})_4]^-$, протекающие самопроизвольно во всем диапазоне температур.

Известно, что процесс выщелачивания золота может осложняться тем, что на границе раздела фаз может происходить конкурирующая реакция образования нерастворимого осадка простого тиоцианата золота (I) (AuSCN), который блокирует поверхность золота и снижает его извлечение. На рисунке 3 представлены результаты расчета энергий Гиббса вероятных реакций образования AuSCN .

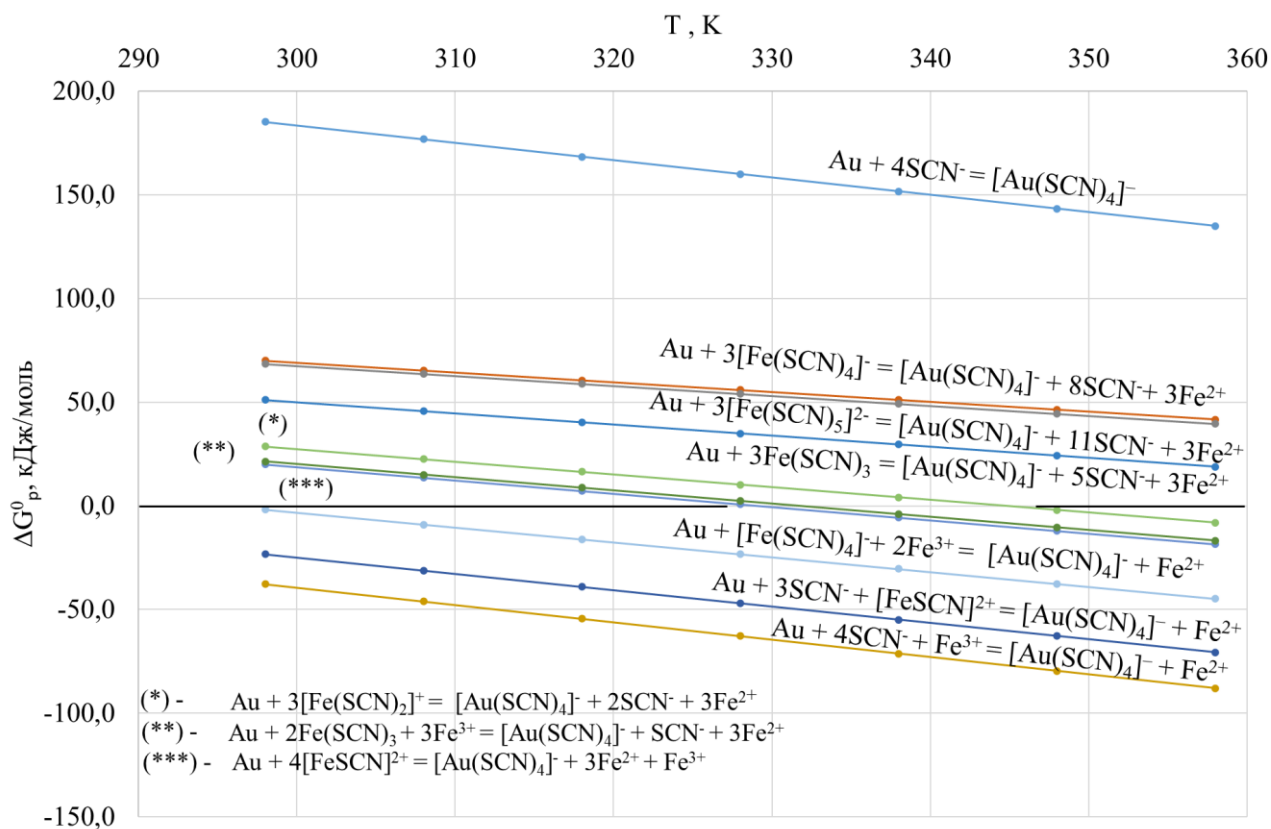


Рисунок 2 – Изменение энергии Гиббса реакций образования $[\text{Au}(\text{SCN})_4]^-$ при различных температурах

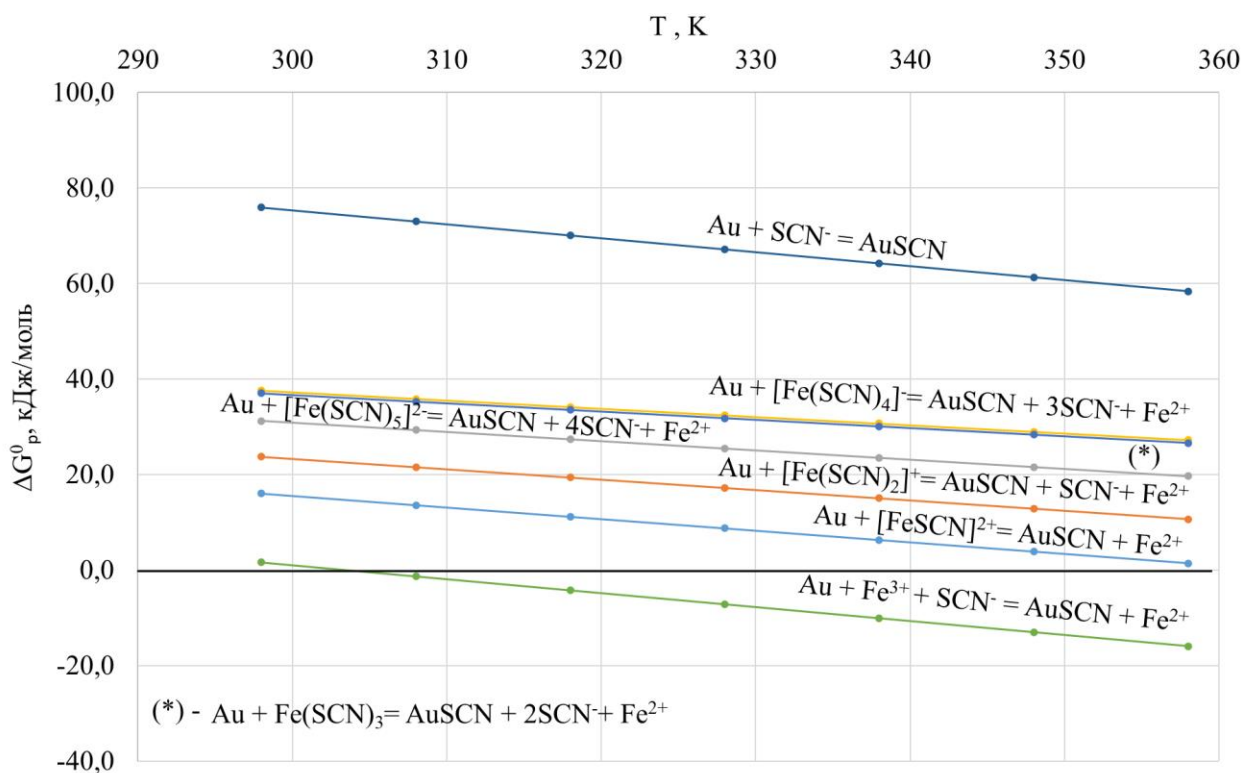


Рисунок 3 – Изменение энергии Гиббса реакций образования AuSCN при различных температурах

Показано, что наиболее вероятной будет реакция со свободным тиоцианат-ионом и ионов Fe(III), которая начинает протекать самопроизвольно при температуре выше 303–305 К. Прочие рассмотренные реакции имеют положительное значение ΔG_p^0 и вероятность их протекания без дополнительных энергетических факторов близка к нулевой. Возможно, процесс образования AuSCN при выщелачивании имеет иной механизм, не связанный с взаимодействием металлического золота с тиоцианатом. Тем не менее, факт образования AuSCN подтверждается мировой практикой и требует теоретического и практического решения.

Расчетным путем показано, что при обеспечении избытка свободных тиоцианат-ионов и ионов Fe(III) AuSCN растворяется с образованием $[\text{Au}(\text{SCN})_2]^-$ и $[\text{Au}(\text{SCN})_4]^-$. На рисунках 4 и 5 представлены результаты расчета изменения энергий Гиббса реакций растворения AuSCN.

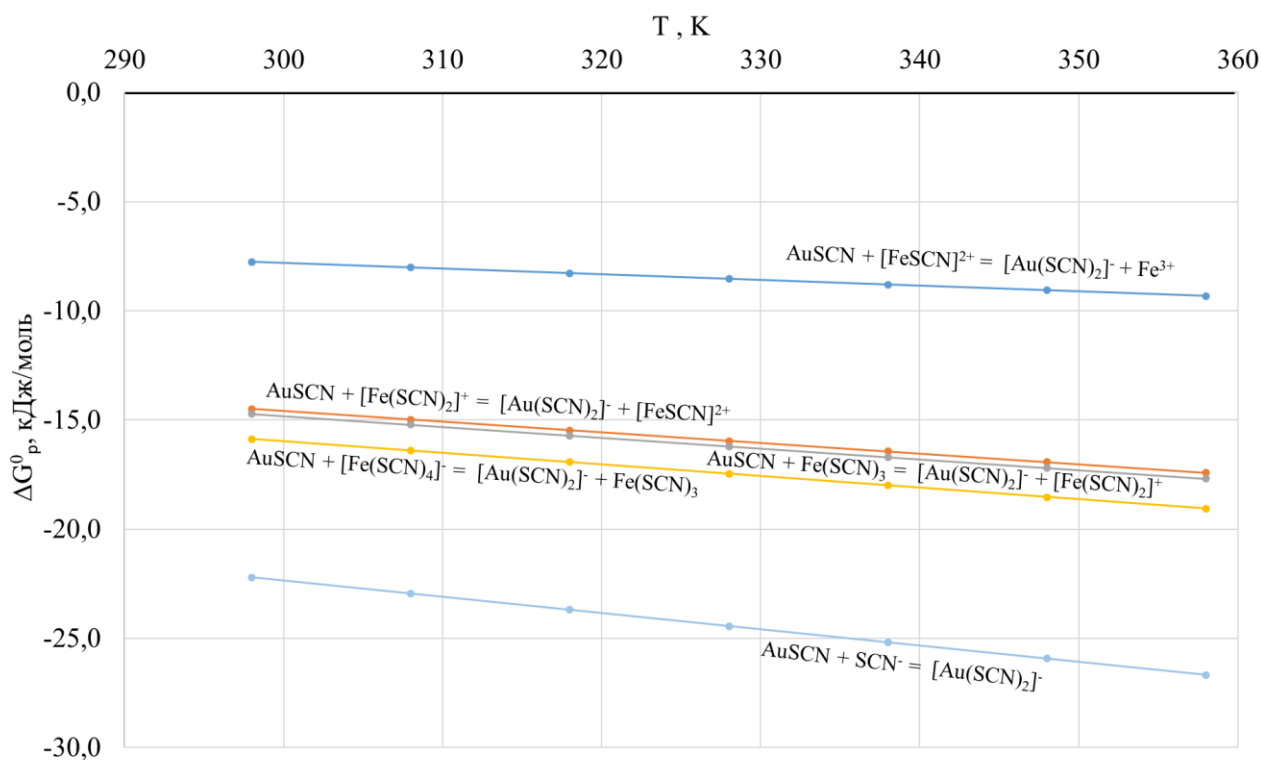


Рисунок 4 – Изменение энергии Гиббса реакций растворения AuSCN с образованием $[\text{Au}(\text{SCN})_2]^-$ при различных температурах

Как видно из рисунка 4, реакции растворения AuSCN с образованием $[\text{Au}(\text{SCN})_2]^-$ протекают самопроизвольно во всем диапазоне температур, что можно объяснить низким энергетическим барьером ввиду отсутствия окислительно-восстановительного процесса. При этом влияние температуры не оказывает значительного влияния на растворение AuSCN.

Установлено, что растворение AuSCN с образованием $[\text{Au}(\text{SCN})_4]^-$ протекает за счет реакций со свободным тиоцианат-ионом, ионом Fe(III), а также с комплексом $[\text{FeSCN}]^{2+}$. Также выявлен наиболее вероятный механизм образования AuSCN путем восстановления комплекса $[\text{Au}(\text{SCN})_4]^-$ ионами Fe(II), согласно реакциям (рисунок 5), у которых $\Delta G_p^0 > 0$ и, вследствие чего, их протекание возможно в обратном направлении в сторону исходных продуктов. В данном случае вероятность разрушения (восстановления) комплекса $[\text{Au}(\text{SCN})_4]^-$ обратно пропорциональна температуре. Таким образом показано, что наличие в системе ионов Fe^{2+} (следовательно, снижение потенциала) может приводить к потерям золота в форме простого тиоцианата.

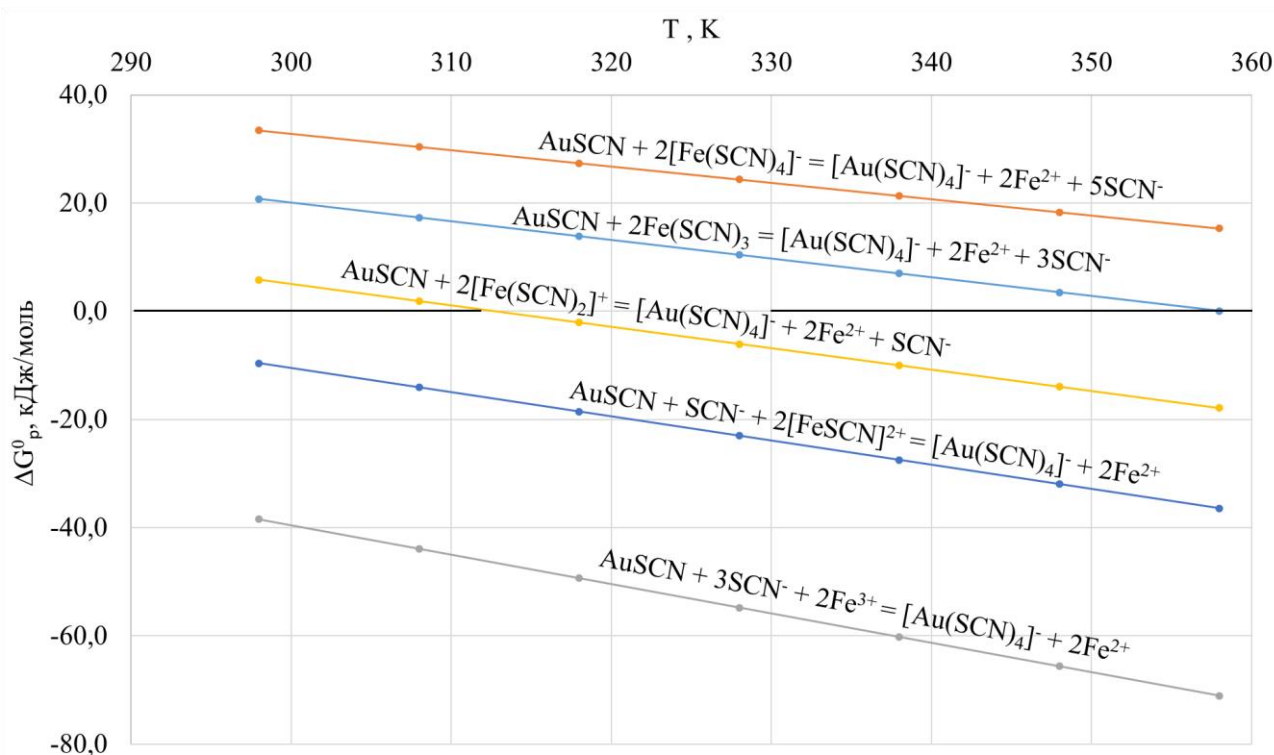


Рисунок 5 – Изменение энергии Гиббса реакций растворения AuSCN с образованием $[\text{Au}(\text{SCN})_4]^-$ при различных температурах

Термодинамические расчеты подтверждают способность AuSCN растворяться с образованием комплексов $[\text{Au}(\text{SCN})_2]^-$ и $[\text{Au}(\text{SCN})_4]^-$ в присутствии свободных ионов SCN^- , ионов Fe(III) и тиоцианатных комплексов железа.

Параллельно проведен термодинамический анализ поведения оксидов урана (UO_2 и UO_3) при серноокислотно-тиоцианатном выщелачивании. Расчеты проведены классическим методом, согласно которому ΔG реакций рассчитывали как разность сумм изменения энергий Гиббса образования продуктов реакций и исходных веществ. Все расчеты проводили для температуры 298 К, так как данные условия соответствуют температурному режиму КВ.

В таблице 1 приведены результаты термодинамических расчетов для вероятных реакций урана в серноокисло-тиоцианатной системе.

Таблица 1 – Изменение энергии Гиббса реакций выщелачивания урана

Реакции	ΔG_{298}^0 , кДж
$\text{UO}_2 + 2\text{H}_2\text{SO}_4 = \text{U}(\text{SO}_4)_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	-33,7
$\text{UO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4 = \text{UO}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}$	-67,4
$\text{UO}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4 + \text{Fe}^{3+} = \text{UO}_2\text{SO}_4 + 2\text{Fe}^{2+} + 2\text{H}^+$	-105,5
$\text{UO}_2 + \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 = \text{UO}_2\text{SO}_4 + 2\text{FeSO}_4$	-77,71
$\text{U}^{4+} + \text{SCN}^- = \text{USCN}^{3+}$	-6,7
$\text{U}^{4+} + 2\text{SCN}^- = \text{U}(\text{SCN})_2^{2+}$	-11,5
$\text{U}^{4+} + 3\text{SCN}^- = \text{U}(\text{SCN})_3^+$	-22,6
$\text{U}^{4+} + 4\text{SCN}^- = \text{U}(\text{SCN})_4$	-18,9
$\text{U}^{4+} + 5\text{SCN}^- = \text{U}(\text{SCN})_5^-$	-21,6
$\text{UO}_2^{2+} + \text{SCN}^- = \text{UO}_2\text{SCN}^+$	-2,2
$\text{UO}_2^{2+} + 2\text{SCN}^- = \text{UO}_2(\text{SCN})_2$	-3,4
$\text{UO}_2^{2+} + 3\text{SCN}^- = \text{UO}_2(\text{SCN})_3^-$	-4,1
$\text{UO}_2^{2+} + 4\text{SCN}^- = \text{UO}_2(\text{SCN})_4^{2-}$	-4,3
$\text{UO}_2^{2+} + 5\text{SCN}^- = \text{UO}_2(\text{SCN})_5^{3-}$	-4,1

Расчеты показали, что в сернокислых средах термодинамически приоритетными являются процессы формирования сульфата уранила. Вероятность взаимодействия урана и уранила с тиоцианатом выше нуля ($\Delta G_p^0 < 0$), но значительно меньше вероятности образования их сульфатов. Следовательно, уран в данных средах будет присутствовать преимущественно в форме уранил-сульфата.

Таким образом, расчеты доказали возможность сернокислотно-тиоцианатного выщелачивания золотоурановых руд. При этом золото переходит в раствор в виде тиоцианатных, а уран – в форме сульфатных комплексов. Для повышения извлечения золота и урана необходимо поддерживать постоянную концентрацию ионов Fe(III) в растворе и препятствовать накоплению ионов Fe(II).

Глава 3 посвящена изучению вещественного состава, свойств исследуемой руды и лабораторным исследованиям по определению оптимальных параметров совместного агитационного выщелачивания золота и урана.

Объектом исследований по совместному сернокислотно-тиоцианатному выщелачиванию золота и урана являлась проба золотоурановой руды одного из месторождений Российской Федерации.

Химический состав руды представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Химический состав пробы золотоурановой руды

Компоненты	Содержание, масс. %	Компоненты	Содержание, масс. %
SiO ₂	65,9	Fe _{окисл.}	4,26
Al ₂ O ₃	15,9	Fe _{сульф.}	0,02
TiO ₂	0,5	Fe _{окисл.}	4,26
CaO	0,8	S _{общ.}	0,097
Na ₂ O	0,8	S _{сульф.}	0,020
K ₂ O	7,4	S _{окисл.}	0,077
MgO	0,3	S _{общ.}	<0,05
MnO	0,02	S _{орг.}	<0,05
P ₂ O ₅	0,3	S _{карб.}	<0,05
As	0,058	U, г/т	48,7
Fe _{общ.}	4,28	Ag, г/т	6,9
Fe _{сульф.}	0,02	Au, г/т	0,80

Примечание: содержание Zn, Cu, Pb, As, Sb, Be, Bi, Cd, Hg, Mo, Ni, Sc, Sn, Se, Sr, Te, V, W, Y, Zr ниже предела обнаружения

Основными ценными компонентами являются золото и уран с содержанием 0,80 и 48,7 г/т соответственно. По результатам рационального анализа установлено, что золото находится преимущественно в цианируемой форме (извлечение цианированием составляет 91,1 %). По содержанию сульфидов проба относится к убогосульфидному типу руд. Уран в пробе локализован в упорных первичных минералах – браннерите и коффините.

Исследования по совместному агитационному выщелачиванию золота и урана проводили на крупности материала 95 % минус 0,071 мм с соотношением Ж:Т = 3:1 при изменении следующих параметров:

концентрация H₂SO₄: 5–30 г/дм³ (при [SCN⁻] = 0,5 г/дм³, [Fe³⁺] = 1 г/дм³, 65 °С, 10 ч);

концентрация SCN⁻: 0,1–2,0 г/дм³ (при [H₂SO₄] = 15 г/дм³, [Fe³⁺] = 1 г/дм³, 65 °С, 10 ч);

концентрация Fe³⁺: 1–10 г/дм³ (при [H₂SO₄] = 15 г/дм³, [SCN⁻] = 0,5 г/дм³, 65 °С, 5 ч);

тип окислителя: MnO₂, H₂O₂, NaNO₂ (при [H₂SO₄] = 30 г/дм³, [SCN⁻] = 0,5 г/дм³, 65 °С, 5 ч);

температура: опыты по выщелачиванию золота и урана проводили в диапазоне температур 25–85 °С. Состав рабочего раствора поддерживался постоянным: [H₂SO₄] – 10 г/дм³, [SCN⁻] = 0,5 г/дм³, [Fe³⁺] = 1 г/дм³.

На рисунке 6 представлена зависимость извлечения золота и урана от концентрации серной кислоты.

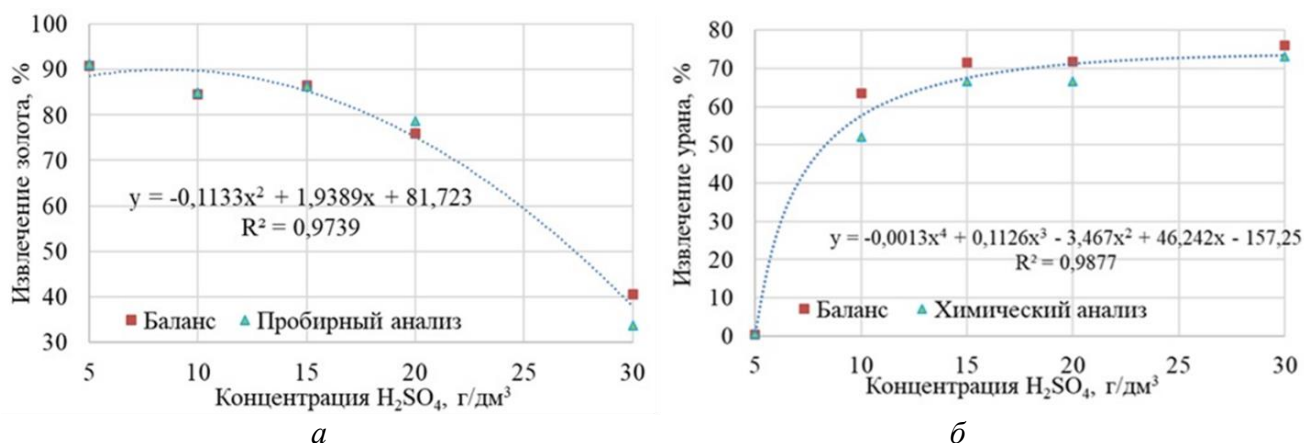


Рисунок 6 – Извлечение при различной концентрации H_2SO_4 :

а – золота; *б* – урана

Показано, что оптимальная начальная концентрация серной кислоты при выщелачивании золота и урана составляет 10–15 г/дм³. При этом извлечение золота и урана составляет на уровне 90 и 70 % соответственно. Повышение кислотности до 20–30 г/дм³ практически не влияет на извлечение урана, но снижает извлечение золота в раствор.

Извлечение золота и урана из руды при различной концентрации тиоцианата представлена на рисунке 7.

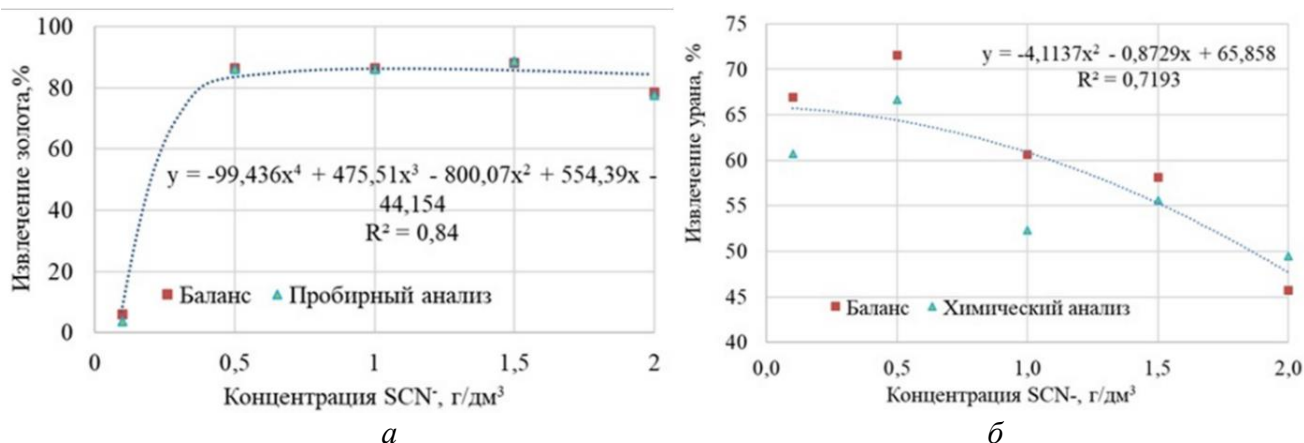


Рисунок 7 – Извлечение при различной концентрации тиоцианата:

а – золота; *б* – урана

Как видно из данных рисунка 7, оптимальная начальная концентрация тиоцианата при выщелачивании золота и урана составляет 0,5 г/дм³. При этом извлечение золота и урана – на уровне 86 и 72 % соответственно. Повышение концентрации тиоцианата до 1,5–2,0 г/дм³ практически не влияет на извлечение золота, но снижает извлечение урана в раствор.

Извлечение золота и урана из руды при различной концентрации ионов $Fe(III)$ представлена на рисунке 8.

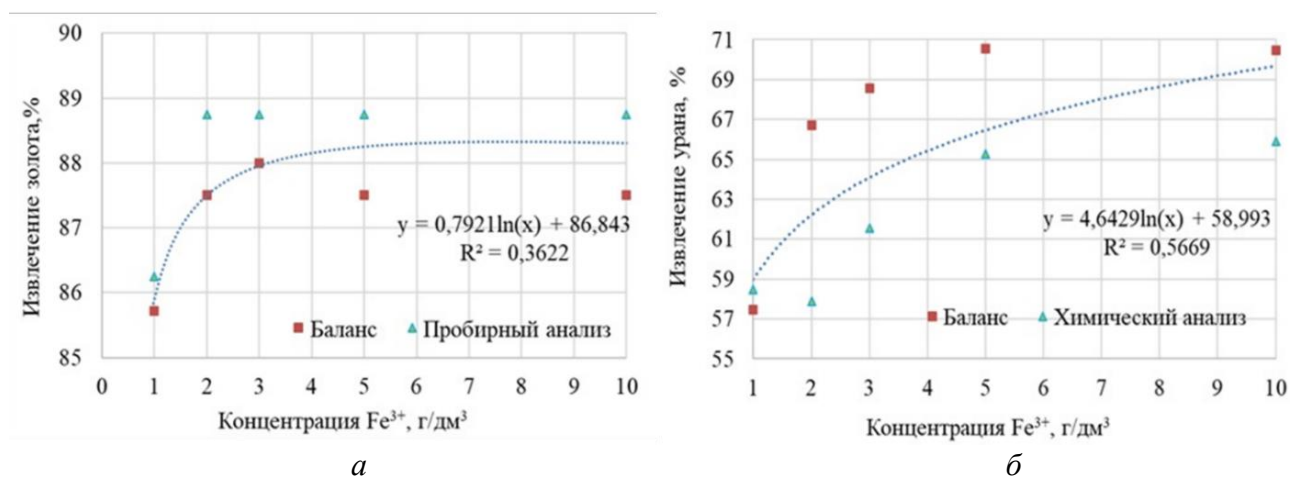


Рисунок 8 – Извлечение при различной концентрации ионов Fe(III):
а – золота; б – урана

Согласно данным рисунка 8, оптимальная начальная концентрация ионов Fe(III) при выщелачивании золота и урана составляет 1–3 г/дм³. В данном случае извлечение золота и урана составляет на уровне 88 и 69 % соответственно. Увеличение концентрации ионов Fe(III) в системе является необязательной, так как существенно не влияет на извлечение металлов в раствор.

Извлечение золота и урана из руды при различных окислителях представлено на рисунке 9.

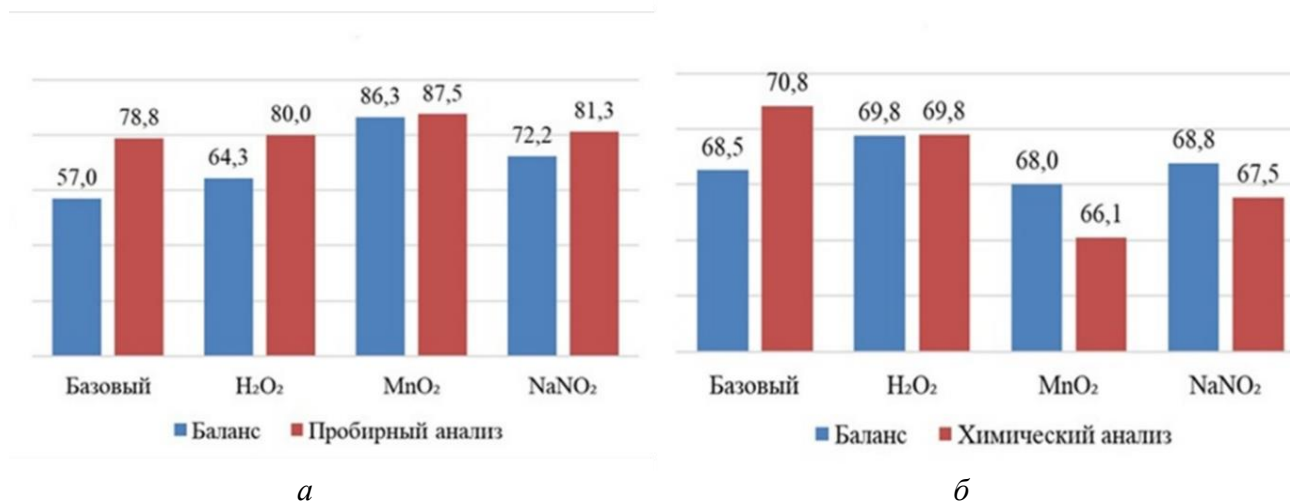


Рисунок 9 – Извлечение при использовании различных окислителях:
а – золота; б – урана

Как видно из данных рисунка 9, оптимальным окислителем при выщелачивании золота и урана является MnO₂. При этом извлечение золота и урана составляет на уровне 86,3 и 68,0 % соответственно. В базовом опыте (без добавления окислителя) извлечение золота снижается до 57,0 % при сохранении стабильного извлечения урана, а применение H₂O₂ и NaNO₂ приводит к снижению извлечения золота до 64,3 % и 72,2 % соответственно.

Результаты извлечения золота и урана из руды при различных температурах представлены на рисунке 10.

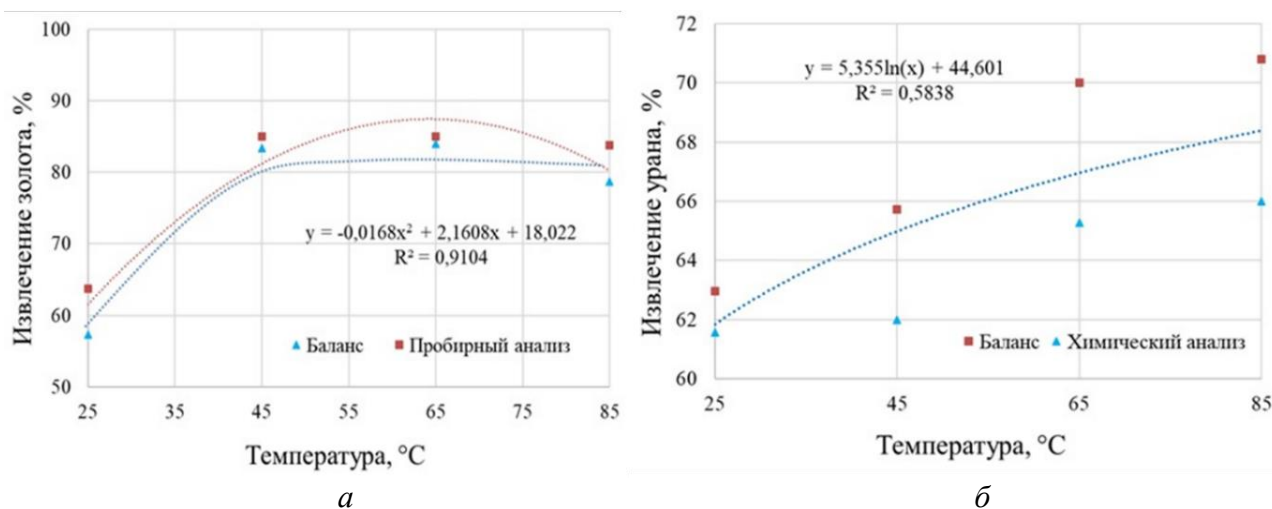


Рисунок 10 – Извлечение при различных температурах: а – золота; б – урана

Согласно данным рисунка 10, оптимальная температура выщелачивания золота и урана составляет 65 °С. При этом извлечение золота и урана достигает 84,0 и 70,7 % соответственно.

Извлечение золота при 25 °С составляет 57,3 %. Повышение температуры до 85 °С приводит к снижению извлечения до 78,7 % (по сравнению с 84,0 % при 65 °С). Это обусловлено неустойчивостью тиоцианат-иона в кислой среде при высоких температурах, что приводит к его разложению и, как следствие, к снижению извлечения золота в раствор. Также установлено, что извлечение урана закономерно возрастает с ростом температуры от 63,0 % (при 25 °С) до 70,8 % при 85 °С (при 65 °С извлечение составляет 70,7 %).

В результате проведенных лабораторных исследований определены оптимальные параметры совместного агитационного выщелачивания золота и урана из окисленной золотоурановой руды: концентрации H_2SO_4 – 10–15 г/дм³, SCN^- – 0,5 г/дм³, Fe(III) – 1–3 г/дм³, температура – 65 °С, использование MnO_2 в качестве окислителя. Обеспечение указанного режима позволяет достичь извлечения золота в раствор на уровне 86–89 % и урана 68–70 %. При данных условиях золото растворяется за 15–30 мин, а уран – за 6 ч при расходе реагентов, кг/т: H_2SO_4 – 30, MnO_2 – 8,5 и KSCN – 1,25.

На основе проведенных исследований получен патент РФ на изобретение № 2791169 «Способ извлечения золота и урана из золотоурановых руд».

Глава 4 посвящена укрупненно-лабораторным испытаниям по кучному сернокислотно-тиоцианатному выщелачиванию золота и урана из исследуемой руды. Испытания проводили в перколяционной колонне на пробе руды массой 180,9 кг и крупностью минус 40+0 мм (без предварительного окомкования). Содержание золота 0,8 г/т, урана 0,0266 %, по содержанию других элементов состав пробы аналогичен составу, приведенному в таблице 2. Общая продолжительность процесса составила 90 сут (при температуре 25 °С). На рисунке 11 представлена принципиальная аппаратурно-технологическая схема укрупненно-лабораторных испытаний по совместному кучному выщелачиванию золота и урана из окисленной золотоурановой руды.

В процессе укрупненно-лабораторных испытаний концентрацию H_2SO_4 в выщелачивающем растворе поддерживали на уровне 5 г/дм³, SCN^- – 0,5 г/дм³, ионов Fe(III) – 1–3 г/дм³; окислительно-восстановительный потенциал (ОВП) 0,49–0,51 В поддерживали подачей окислителя, в качестве которого испытаны MnO_2 и H_2O_2 . Показано, что в условиях КВ H_2O_2 является более оптимальным окислителем, так как обеспечивает высокую скорость окисления ионов Fe(II) до Fe(III). MnO_2 менее активен,

что замедляет процесс окисления железа, приводит к значительным колебаниям ОВП и требует значительного избытка реагента, что способствует росту расхода как самого окислителя, так и H_2SO_4 на его растворение. Для извлечения металлов из полученных растворов проводили их отдельную сорбцию, при которой золото извлекали на активированный уголь, а уран — на ионообменную смолу.

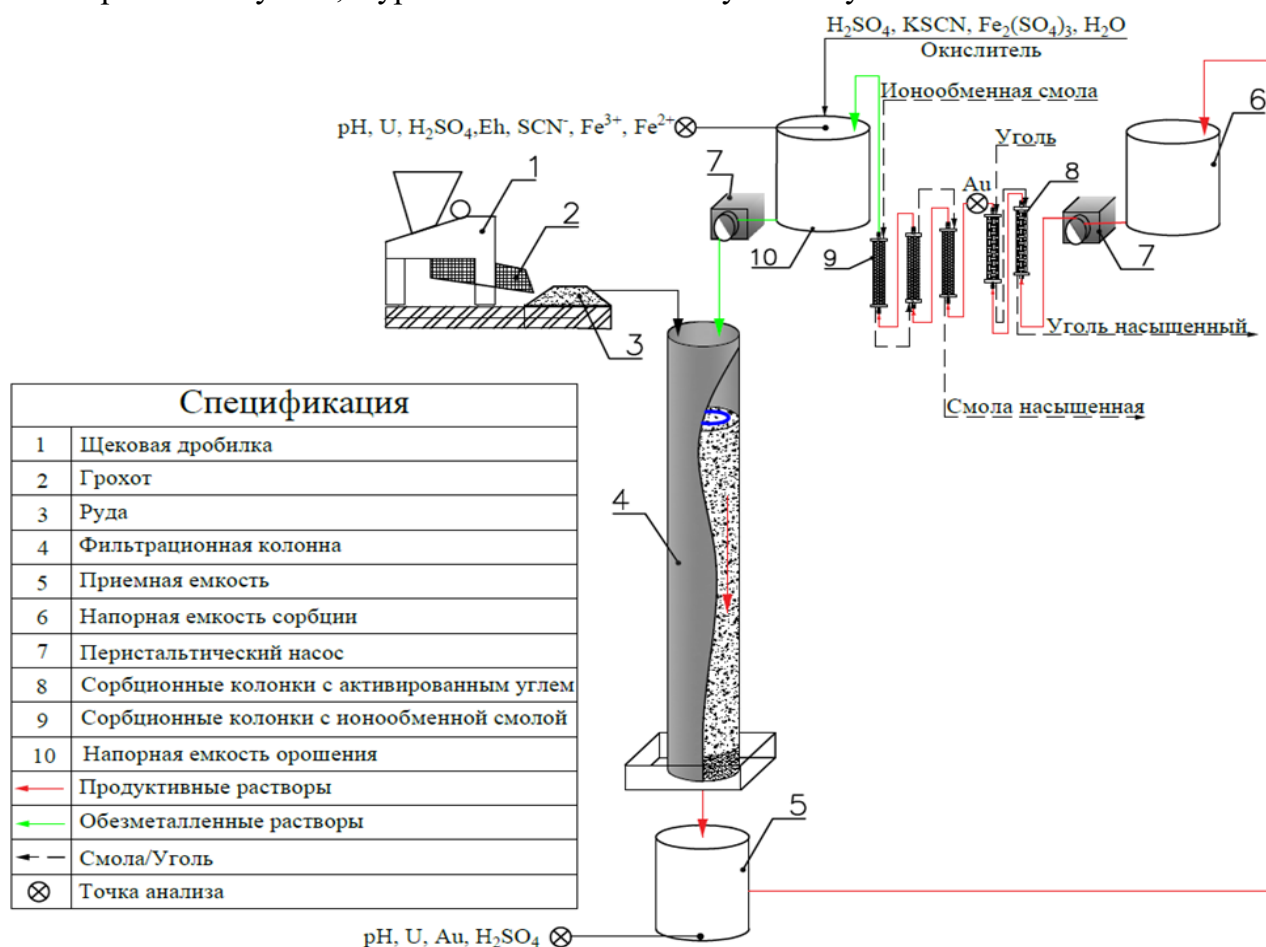


Рисунок 11 – Принципиальная аппаратурно-технологическая схема укрупненно-лабораторных испытаний по кучному выщелачиванию золота и урана из золотоурановой руды

На рисунке 12 представлены результаты выщелачивания золота и урана в процессе проведения укрупненных испытаний.

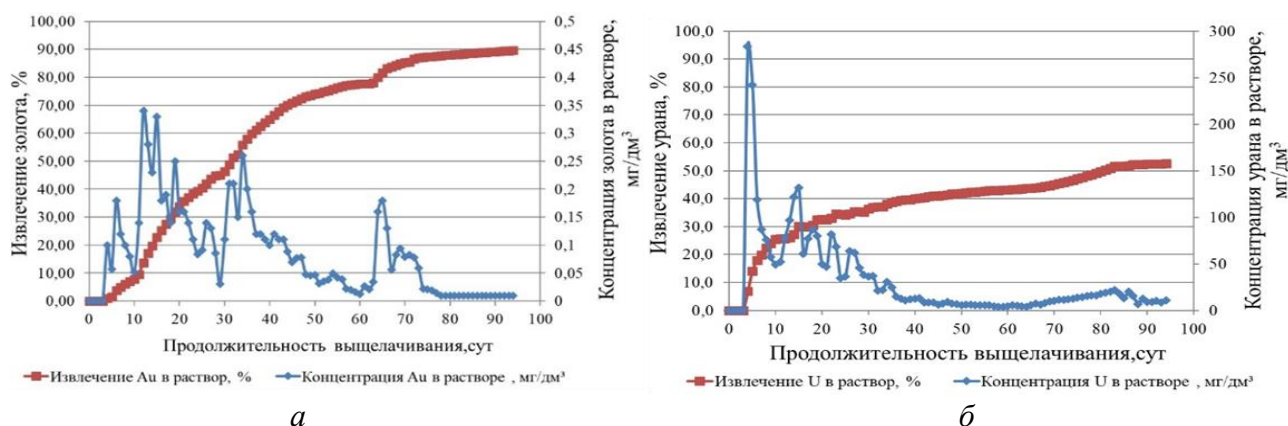


Рисунок 12 – Динамика извлечения: а – золота; б – урана

Как видно из данных рисунка 12, пиковые концентрации золота в процессе испытаний составляли 0,33–0,34 мг/дм³. К 48-м суткам концентрация золота в продуктивных растворах снизилась до 0,05 мг/дм³. Нисходящая динамика сохранялась вплоть до 60-х сут, когда концентрация золота снизилась до 0,02–0,03 мг/дм³. Данные показатели соответствовали извлечению золота на уровне 78 %.

Снижение динамики выщелачивания золота, вероятно, связано с образованием на поверхности металла нерастворимого осадка AuSCN, возможность и вероятный механизм образования которого подтверждается термодинамическими расчетами, представленными в главе 2.

Термодинамические расчеты показали, что AuSCN может растворяться с образованием комплексов золота в присутствии как свободного тиоцианата, так и Fe(III)-тиоцианатных комплексов. При этом наличие свободного тиоцианата может оказывать больший эффект, что можно объяснить низким энергетическим барьером ввиду отсутствия окислительно-восстановительного процесса.

Ввиду вышесказанного, на 67 сут испытаний, когда концентрация золота в продуктивных растворах снизилась до критических значений, было принято решение повысить концентрацию тиоцианат-ионов в выщелачивающем растворе до 2–3 мг/дм³. Концентрация тиоцианат-ионов подбиралась таким образом, чтобы соотношение $\text{Fe}^{3+}/\text{SCN}^-$ в растворе составляло $\leq 0,5$. Данная корректировка режима направлена на увеличение концентрации свободного (не связанного с железом) тиоцианата в растворе, который способен растворять AuSCN.

При увеличении концентрации тиоцианат-ионов в растворе выщелачивание золота возобновилось, его концентрация выросла с 0,02 до 0,18 мг/дм³. Данная корректировка режима выщелачивания позволила дополнительно извлечь из руды около 10 % золота. Суммарное извлечение золота составило около 90 %.

Кроме того, повышение концентрации тиоцианата привело к резкому увеличению концентрации урана в растворе (см. рисунок 12): с 9 до 23 мг/дм³. Поскольку термодинамические расчеты показали, что вероятность образования тиоцианатных комплексов урана в сульфатной среде очень мала, наиболее вероятным объяснением увеличения концентрации урана является повышение активности свободных сульфат-ионов, вызванное связыванием ионов железа (ранее связанного в сульфаты) в прочные тиоцианатные комплексы. Возможно, аналогичного эффекта можно было бы добиться путем увеличения концентрации серной кислоты, например, до 10 г/дм³, что не противоречит условиям эксперимента.

Укрупненно-лабораторные испытания подтвердили эффективность совместного выщелачивания золота и урана из золотоурановой руды в единый продуктивный раствор. При этом извлечение золота в раствор составило 90 %, а урана – 50 %. Расход реагентов составил, кг/т: H_2SO_4 – 10,5 (с учетом закисления руды), KSCN – 0,94, H_2O_2 – 0,65. Полученные результаты позволяют рекомендовать данную технологическую схему для опытно-промышленных испытаний на золотоурановых месторождениях РФ.

На основе полученных результатов укрупненно-лабораторных испытаний получен патент РФ на изобретение № 2811640 «Способ извлечения золота из руд и продуктов тиоцианатным выщелачиванием».

В главе 5 приведена предложенная технологическая схема совместного КВ золотоурановой руды сернокислыми тиоцианатными растворами (рисунок 13). Проведена экономическая оценка предлагаемой технологии.

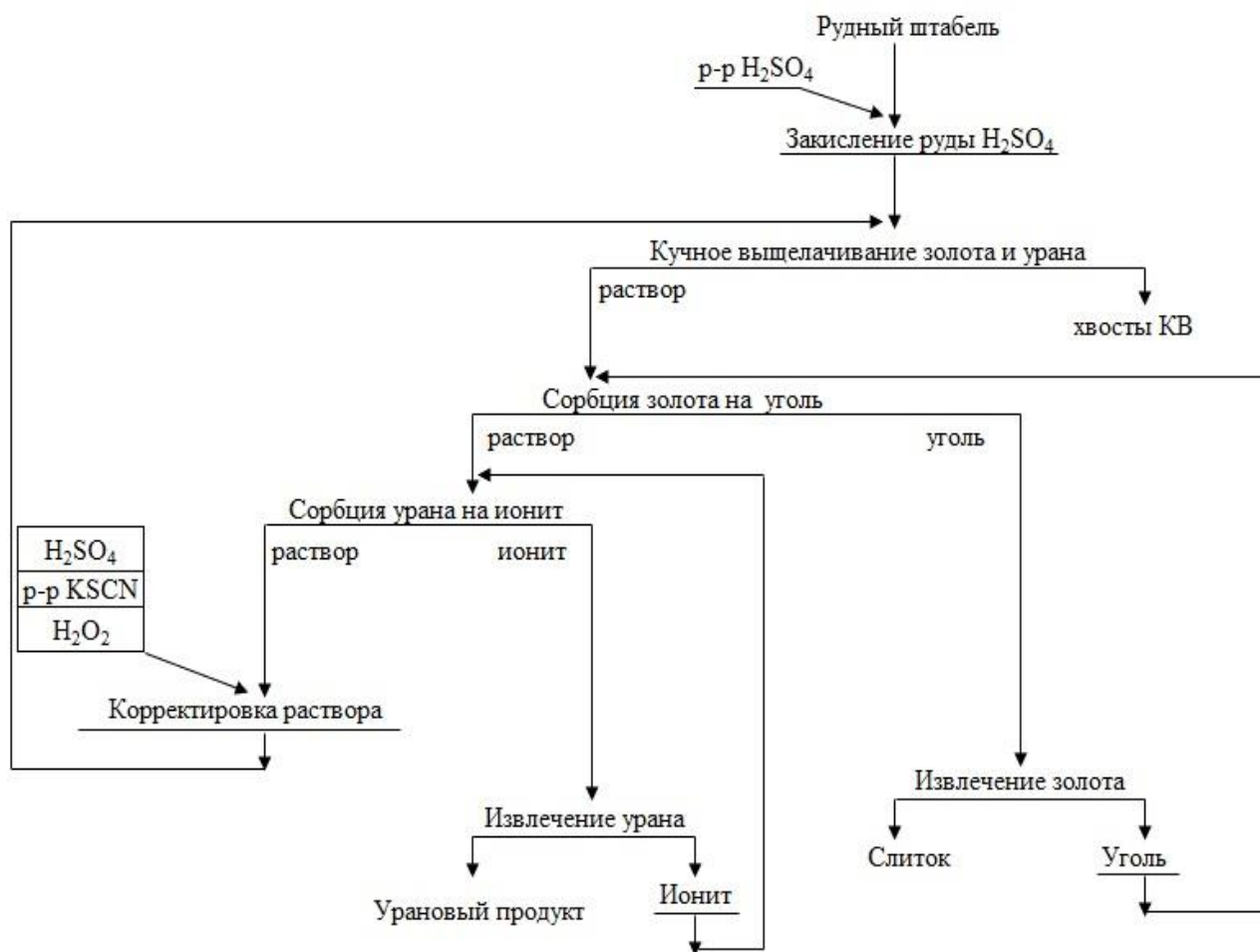


Рисунок 13 – Рекомендуемая принципиальная технологическая схема совместного кучного выщелачивания золота и урана сернокислыми тиоцианатными растворами

Сезонные эксплуатационные затраты на реализацию предлагаемой технологии при производительности установки КВ 300 тыс. т руды составляют 222 286,6 тыс. руб. (включая расходы на реагенты, электроэнергию, оплату труда, содержание оборудования и амортизационные отчисления). Себестоимость переработки 1 т руды по предлагаемой схеме (без учета затрат на добычу, рудоподготовку, укладку штабеля и переработку насыщенных сорбентов) составляет 741 руб. Полученные экономические показатели не отражают полной «экономической картины» предлагаемой схемы, но могут быть использованы для сравнения с другими технологическими решениями, например, с традиционными цианидной и сернокислотной переработкой золотоурановых руд.

В **заключении** содержатся краткие результаты проведенных исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Научно обоснована и разработана принципиальная технологическая схема совместного сернокисотно-тиоцианатного кучного выщелачивания золота и урана из окисленной золотоурановой руды с возможностью их дальнейшего разделения.

1. Анализ современного состояния гидрометаллургических способов извлечения золота и урана показал актуальность поиска нецианидных реагентов, эффективных в кислой среде ($pH < 3$) и способных обеспечивать одновременный перевод золота и урана в раствор при переработке золотоурановых руд.

2. Определен вероятный механизм выщелачивания золота, образования и растворения AuSCN в интервале температур от 298 до 358 К, а также механизм растворения оксидов урана и взаимодействия ионов урана и уранила с тиоцианат-ионами при 298 К. Установлено, что в присутствии тиоцианат-иона, ионов Fe(III) и тиоцианатных комплексов Fe(III) процессы выщелачивания золота и растворения AuSCN протекают с преимущественным образованием комплекса $[\text{Au}(\text{SCN})_4]^-$. Также показано, что выщелачивание UO_2 протекает с участием ионов Fe(III) в качестве окислителя, а UO_3 – без окислителя. При этом формирование сульфатных комплексов урана термодинамически более вероятно, чем их прямое взаимодействие с тиоцианат-ионами, а последующее замещение сульфат-ионов на тиоцианат-ионы термодинамически невыгодно.

3. Изучен вещественный состав окисленной золотоурановой руды со средним содержанием золота 0,8 г/т и урана 0,00487–0,0266 масс. %. По данным минерального состава уран преобладает в виде браннерита и коффинита, что характеризует руду как упорную применительно к выщелачиванию урана. При этом рациональный анализ показал возможность извлечения золота до 91,1 % прямым цианированием, что определяет исследуемую пробу как легкоцианируемую.

4. В результате проведенных лабораторных исследований определены оптимальные параметры совместного агитационного выщелачивания золота и урана из окисленной золотоурановой руды: концентрации H_2SO_4 – 10–15 г/дм³, SCN^- – 0,5 г/дм³, Fe(III) – 1–3 г/дм³; температура = 65 °С, применение MnO_2 в качестве окислителя. Обеспечение указанного режима позволяет достичь извлечения золота в раствор на уровне 86–89 % и урана 68–70 %. При данных условиях золото растворяется за 15–30 мин, а уран – за 6 ч (при расходе реагентов, кг/т: H_2SO_4 – 30, MnO_2 – 8,5 и KSCN – 1,25).

5. Проведены укрупненно-лабораторные испытания по кучному выщелачиванию золота и урана из окисленной золотоурановой руды с совместным переводом золота и урана в раствор и последующей селективной сорбцией. Полный цикл выщелачивания составил 90 сут (при Ж:Т = 8:1). Извлечение золота в раствор при этом составило 90 %, урана 50 % при расходе реагентов, кг/т: H_2SO_4 – 10,5 (с учетом закисления руды), KSCN – 0,94, H_2O_2 – 0,65. Имеется акт испытаний в АО «Иргиредмет».

6. На основании проведенных укрупненно-лабораторных испытаний разработана принципиальная технологическая схема КВ золота и урана серноокислыми тиоциантными растворами с одновременным переводом металлов в продуктивный раствор в условиях кучного выщелачивания.

7. Себестоимость совместного серноокисотно-тиоцианатного выщелачивания металлов из 1 т окисленной золотоурановой руды по предлагаемой схеме (без учета затрат на стадии рудоподготовки, отсыпки рудного штабеля и переработки насыщенных сорбентов) составляет 741 руб.

8. Разработанная технология является перспективной альтернативой традиционным схемам переработки золотоурановых руд со сложным вещественным составом и низким содержанием полезных компонентов.

9. Результаты работы внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «ИРНИТУ» для обучающихся по направлению «Металлургия».

Рекомендации и перспективы дальнейшего развития темы

Дальнейшие исследования в рамках этой тематики могут быть направлены к переработке смешанного и первичного (сульфидного) золотоуранового сырья, включая последующее сорбционное извлечение металлов (золота – на активированный уголь,

урана – на ионообменную смолу) из единого раствора и их отдельную десорбцию с получением селективных товарных продуктов.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи из Перечня изданий, рекомендованных ВАК РФ

1. Епифоров, А.В. Нецианидные реагенты для извлечения золота из продуктов автоклавного окисления сульфидных концентратов / А.В. Епифоров, С.В. Баликов, **А.А. Шипнигов**, А.А. Лукьянов // Цветные металлы. – 2021. – № 7 (943). – С. 37–44. (*журнал индексируется международной наукометрической базой данных Scopus*).
2. **Шипнигов, А.А.** Кучное сернокислотно-тиоцианатное выщелачивание золота и урана / **А.А. Шипнигов**, Р.М. Собенников, А.В. Епифоров, Е.Д. Мусин // iPolytech Journal. – 2023. – Т. 27, № 4. – С. 821–828.
3. **Шипнигов, А.А.** Термодинамическая оценка процесса одновременного выщелачивания золота и урана сернокислыми тиоцианатными растворами / **А.А. Шипнигов**, А.В. Епифоров, Т.С. Минеева // iPolytech Journal. – 2026. – Т. 30, № 3. – С. 559–572.

Патенты

4. Пат. 2791169 Российская Федерация, МПК С22В 60/02. Способ извлечения золота и урана из золотоурановых руд / **А.А. Шипнигов**, Е.Д. Мусин, А.В. Епифоров; заявитель и патентообладатель АО «Иргиредмет». № заявки 2021118671, заявл. 28.06.2021; опубл. 03.03.2023. Бюл. № 7.
5. Пат. 2811640 Российская Федерация, МПК С22В 11/00. Способ извлечения золота из руд и продуктов тиоцианатным выщелачиванием / **А.А. Шипнигов**, Е.Д. Мусин, А.В. Епифоров; заявитель и патентообладатель АО «Иргиредмет». № заявки 2022133649; заявл. 20.12.2022; опубл. 15.01.2024, Бюл. № 2.

Другие публикации

6. Собенников, Р.М. Пути решения проблемы совместного извлечения золота и урана из бедных комплексных руд / Р.М. Собенников, Т.С. Минеева, **А.А. Шипнигов** // Молодежный вестник ИрГТУ. – 2021. – Т. 11, № 2. – С. 29–33.
7. **Шипнигов, А.А.** Пилотные испытания технологии кучного выщелачивания золота и урана из бедной окисленной золотоурановой руды / **А.А. Шипнигов**, Р.М. Собенников // Наука и инновации – современные концепции: сб. науч. ст. по итогам Междунар. науч. форума (08 окт. 2021 г.). – Москва: Изд-во Инфинити, 2021. – С. 97–103.
8. **Шипнигов, А.А.** Технологическое картирование месторождений полезных ископаемых как залог устойчивого развития горнодобывающих предприятий / **А.А. Шипнигов**, Р.М. Собенников, А.В. Епифоров, Е.Д. Мусин, С.Г. Григорьев // Золото. Полиметаллы. XXI век: устойчивое развитие: материалы Всерос. науч.-практ. конф. (02–03 марта 2022 г.). – Москва: Изд-во ИПКОН РАН, 2022. – С. 61–62.
9. **Шипнигов, А.А.** Кучное выщелачивание окисленных золотоурановых руд / **А.А. Шипнигов**, Р.М. Собенников, А.В. Епифоров, Е.Д. Мусин // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: материалы XXVII Междунар. науч.-техн. конф. (07–08 апр. 2022 г.). – Екатеринбург: Изд-во ИП Русских А.В., 2022. – С. 190–194.
10. **Шипнигов, А.А.** Лабораторные исследования технологии кучного выщелачивания золотоурановых руд / **А.А. Шипнигов**, Р.М. Собенников, А.В. Епифоров, Е.Д. Мусин // Минерально-сырьевая база алмазов, благородных и цветных

металлов – от прогноза к добыче: сб. тезисов докладов (10–12 апр. 2022 г.). – М.: Изд-во ЦНИГРИ, 2022. – С. 229–233.

11. **Шипнигов, А.А.** Кучное выщелачивание золота и урана из окисленной золотоурановой руды / **А.А. Шипнигов**, Р.М. Собенников, А.В. Епифоров, Е.Д. Мусин, С.Г. Григорьев // Рациональное освоение недр. – 2022. – № 2. – С. 66–71.

12. **Шипнигов, А.А.** Исследование динамики выщелачивания золота и урана серноокислыми тиоцианатными растворами / **А.А. Шипнигов**, Р.М. Собенников, А.В. Епифоров // Плаксинские чтения – 2022: материалы Междунар. конф. (04–07 окт. 2022 г.). – Владивосток, 2022. – С. 329–332.

13. **Шипнигов, А.А.** Определение оптимальных параметров извлечения золота из золотоурановой руды серноокислыми тиоцианатными растворами / **А.А. Шипнигов**, Р.М. Собенников, А.В. Епифоров // Металлургия цветных, редких и благородных металлов: материалы XV Междунар. конф. (06–08 сент. 2022 г.). – Красноярск, 2022. – С. 223–230.

14. **Шипнигов, А.А.** Технологическое картирование месторождений полезных ископаемых как залог устойчивого развития горно-перерабатывающих предприятий / **А.А. Шипнигов**, Р.М. Собенников, А.В. Епифоров, Е.Д. Мусин, С.Г. Григорьев // Золотодобыча. – 2022. – № 8 (285). – С. 19–23.

15. **Shipnigov, A.A.** Combined recovery of gold and uranium from gold-uranium ores / **A.A. Shipnigov**, R.M. Sobennikov, A.V. Epiforov // Proceedings of 10th World Gold Conference (Shenyang, 2023). – Shenyang, 2023. – P. 783–791.

16. Собенников, Р.М. Особенности разработки технологии кучного выщелачивания руд / Р.М. Собенников, **А.А. Шипнигов**, А.В. Епифоров, Е.Д. Мусин // Золотодобыча. – 2023. – № 10(299). – С. 16–19.

17. **Шипнигов, А.А.** Тиоцианат как перспективный заменитель цианида в металлургии золота / **А.А. Шипнигов**, Р.М. Собенников, А.В. Епифоров // Плаксинские чтения – 2023: материалы Междунар. конф. (02–05 окт. 2023 г.). – Москва, 2023. – С. 386–389.

Подписано в печать 20.10.2026. Формат 60 x 90 / 16.

Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 1,25.

Тираж 100 экз. Зак. 88. Поз. плана 2н.

Отпечатано в типографии Издательства
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический университет»
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83