

МИНИСТЕРСТВО ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ И ЭКОЛОГИИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЮ

ФЕДЕРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ ЦЕНТР  
ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И СЕРТИФИКАЦИИ  
МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ «ВИМС»



Научный совет по методам  
технологических исследований

Методические рекомендации № 136

**ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПЕРЕРАБОТКИ БЕДНЫХ  
ОКИСЛЕННЫХ КОМПЛЕКСНЫХ МЕДНЫХ РУД СПОСОБОМ  
КУЧНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ**

Москва, 2019 г.

РАЗРАБОТАНЫ: Федеральным государственным бюджетным учреждением «Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н. М. Федоровского» (ФГБУ «ВИМС»).

СОСТАВИТЕЛИ: Салтыков А.С., Гуров В.А., Мамошин М.Ю., Безносов В.Г.

Редактор (рецензент) Тигунов Л.П.

РАССМОТРЕНЫ И ПРЕДСТАВЛЕНЫ К УТВЕРЖДЕНИЮ: Научным советом по методам технологических исследований (НСОМТИ), протокол № 5 от 15 ноября 2019 г.

Председатель НСОМТИ

Курков А.В.

Ученый секретарь НСОМТИ

Соколова В.Н.

УТВЕРЖДЕНЫ: Федеральным научно-методическим центром лабораторных исследований и сертификации минерального сырья «ВИМС» (ФНМЦ)

Руководитель ФНМЦ «ВИМС»:

Рогожин А.А.



## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ТЕРМИНЫ, ОПРЕДЕЛЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ .....                                                                                                                                                                | 4  |
| ВВЕДЕНИЕ.....                                                                                                                                                                                          | 5  |
| 1. НАЗНАЧЕНИЕ МЕТОДИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ И ОБЛАСТЬ<br>ИХ ПРИМЕНЕНИЯ .....                                                                                                                               | 6  |
| 2. ОСНОВНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ МЕДИ РОССИИ, СОДЕРЖАЩИЕ<br>БЕДНЫЕ ОКИСЛЕННЫЕ РУДЫ КОМПЛЕКСНОГО СОСТАВА .....                                                                                                 | 7  |
| 3. ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ВОЗМОЖНОСТЬ ОТРАБОТКИ<br>ОКИСЛЕННЫХ МЕДНЫХ РУД КОМПЛЕКСНОГО СОСТАВА<br>СПОСОБОМ КУЧНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ.....                                                                    | 9  |
| 3.1. Вещественный состав окисленных медных руд и его влияние на<br>процесс КВ.....                                                                                                                     | 10 |
| 3.2. Водно-физические свойства окисленных медных руд .....                                                                                                                                             | 15 |
| 4. ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОПРОБОВАНИЕ .....                                                                                                                                                                | 17 |
| 4.1. Особенности геотехнологического опробования при способе КВ.....                                                                                                                                   | 17 |
| 4.2. Отбор технологических проб.....                                                                                                                                                                   | 19 |
| 4.3. Лабораторные исследования.....                                                                                                                                                                    | 22 |
| 4.4. Натурные опытные работы .....                                                                                                                                                                     | 27 |
| 4.5. Переработка технологических растворов.....                                                                                                                                                        | 31 |
| 5. МЕРОПРИЯТИЯ ПО ОХРАНЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ.....                                                                                                                                                         | 32 |
| 6. ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПЕРЕРАБОТКИ ОКИСЛЕННЫХ<br>МЕДНЫХ РУД КОМПЛЕКСНОГО СОСТАВА .....                                                                                                                  | 33 |
| 6.1. Критерии оценки.....                                                                                                                                                                              | 33 |
| 6.2. Расчет основных показателей эффективности.....                                                                                                                                                    | 36 |
| 6.2.1. Выбор геотехнологического объекта–аналога .....                                                                                                                                                 | 39 |
| 6.2.2. Методология расчета инвестиционных и эксплуатационных<br>затрат .....                                                                                                                           | 39 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....                                                                                                                                                                                       | 42 |
| ЛИТЕРАТУРА.....                                                                                                                                                                                        | 44 |
| Приложение 1. Обоснование рациональной технологической схемы КВ<br>окисленного комплексного медного сырья на примере лабораторного<br>выщелачивания медно-молибденовых руд Сорского месторождения..... | 45 |
| Приложение 2. Исходные данные для определения экономической<br>эффективности выщелачивания молибдена и меди из отвалов<br>окисленных руд Сорского месторождения .....                                  | 51 |
| Приложение 3. Определение экономической эффективности<br>переработки медно-молибденовых руд методом кучного выщелачивания<br>на примере окисленных руд Сорского месторождения .....                    | 54 |

## ТЕРМИНЫ, ОПРЕДЕЛЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

*выщелачивание* — химический способ (процесс) извлечения растворимого компонента (компонентов) из твердого минерального сырья с помощью реагента-растворителя

*грануляция (окомкование)* — процесс окускования из увлажненного тонкоизмельченного материала

*извлечение полезного компонента* — количество полезного компонента, выщелоченного из руды, выраженное в процентах к его общему количеству в руде и сконцентрированное в продукте выщелачивания — фильтрате

*кек* — твердый материал, оставшийся от руды после выщелачивания

*кольматация* — осаждение в порах материала, слагающего штабель, мелких (коллоидных, глинистых, пылеватых) частиц, что приводит к снижению фильтрационных свойств штабеля

*концентрация* — количество компонента в единице объема раствора

*кучное выщелачивание* — метод добычи редких, рассеянных и других элементов путем их избирательного растворения химическими реагентами в специально сформированном штабеле (куче) в процессе просачивания выщелачивающих растворов через рудный слой

*пилотные испытания* — предварительные, начальные испытания, применяющиеся для проверки новых идей

*приемистость штабеля* — предельная способность поверхности штабеля пропускать (инфильтровать) подаваемый выщелачивающий раствор, измеряется в литрах на 1 м<sup>2</sup> поверхности в час

*проницаемость руд* — способность руд пропускать через себя технологические растворы, оценивается по коэффициенту фильтрации в м/сутки

*содержание полезного компонента* — выраженное в процентах количество полезного компонента в твердом веществе (руде, технологической пробе, нерастворимом остатке, кеке)

### **Принятые сокращения:**

*ГРР* — геологоразведочные работы

*ГТО* — геотехнологическое опробование

*ГРМ* — горнорудная масса, т

*КВ* — кучное выщелачивание

*СПВ* — скважинное подземное выщелачивание

*БПВ* — блоковое подземное выщелачивание

*ВР* — выщелачивающий раствор

*ПР* — продуктивный раствор

*МР* — маточный раствор

*ПК* — полезный компонент

*ТПИ* — твердые полезные ископаемые

*ООС* — охрана окружающей среды

## ВВЕДЕНИЕ

Истощение запасов сырьевой базы меди, на которые были ориентированы работы медно-серных комбинатов, ставит предприятия перед необходимостью изыскания дополнительных медьсодержащих ресурсов. Источником минерального сырья, содержащего цветные и другие металлы, являются окисленные руды. При переработке таких руд традиционным флотационным методом получают низкосортные концентраты при низком извлечении металлов (35–50 %). Наиболее перспективным направлением переработки подобных руд является кучное выщелачивание (КВ).

Сущность способа КВ заключается в переводе металлов, находящихся в руде, сложенной в штабель, просачиванием выщелачивающих растворов (ВР) через неподвижный рудный слой в подвижное состояние в условиях природных температур и давлений с последующим выделением их из растворов в виде концентратов или товарных продуктов.

Способ КВ предполагает получение полезного компонента (ПК) из руды непосредственно на месте или вблизи её залегания, без ее тонкого измельчения и других дорогостоящих заводских процессов. КВ дает возможность рентабельного извлечения металлов из бедных, забалансовых, техногенных и отвальных руд и пород. При относительно низком (50–80 %) извлечении, КВ отличается высокой производительностью и низкой себестоимостью получаемых товарных продуктов, так как можно одновременно обрабатывать большие (от 1 млн т/год и более) объемы руды.

КВ может использоваться как в качестве основного процесса переработки, так и в качестве предварительного обогащения бедных руд, а также при освоении техногенных, малых и средних по запасам месторождений с богатыми рудами, в том числе в регионах с неразвитой инфраструктурой.

Кроме непосредственного выщелачивания специально сформированных на дневной поверхности рудных штабелей применяются такие разновидности КВ как:

- блоковое (скальное) — выщелачивание руд, оставленных в целиках, бедных и забалансовых руд, замагазинированных в подземных горных выработках и камерах;

- отвальное — выщелачивание материала отвалов и хвостохранилищ, расположенных в горных впадинах и отработанных карьерах.

Доля меди, полученной способом КВ с последующим электролизом из продуктивных растворов — технология Solvent Extraction Electrowinning (SX/EW), в общем объеме производства металла постоянно увеличивается. С 1990 по 2013 годы производство меди по технологии КВ увеличилось на 130 % и достигло 19 % общего объема мирового производства. В дореволюционной России сернокислотный способ КВ меди использовался на Кедабеке (БПВ Азербайджан) и на Гумешевском месторождении (Урал). В 1994 году в Чили на руднике Чукикамата, крупнейшем медедобывающем предприятии мира, введена установка по сернокислотному выщелачиванию меди из отвалов, обеспечивающая переработку низкосортных руд (170 млн т с содержанием меди 0,3 %), с эксплуатационными затратами на 30–40 % меньше, чем при использовании традиционной заводской технологии.

## 1. НАЗНАЧЕНИЕ МЕТОДИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ И ОБЛАСТЬ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

Настоящими методическими рекомендациями предлагается комплекс исследований, проводимых в лабораторных и натуральных условиях, для оценки возможности рентабельной переработки бедных окисленных медных руд способом кучного выщелачивания.

Основная задача исследований — технологическая оценка природных факторов, определяющих возможность отработки бедных окисленных медных руд методом КВ, разработка технологических режимов, обеспечивающих стабильное получение оптимальных показателей отработки при минимальных затратах и использовании освоенных технологических процессов и оборудования.

Областью применения методических рекомендаций являются технологические испытания по кучному выщелачиванию бедных окисленных медных руд различных геолого-промышленных типов на разных стадиях геологоразведочных работ с использованием лабораторных, укрупнено-лабораторных и полупромышленных проб.

Методические рекомендации определяют последовательность и порядок проведения геотехнологических исследований на разных стадиях геологоразведочных работ для оценки возможности и целесообразности переработки окисленных комплексных руд меди способом КВ.

На стадии поисковых работ:

- проводятся лабораторные испытания керновых проб различных природных типов руд с оценкой возможности применения способа КВ;
- определяются граничные технологические показатели по извлечению полезного компонента и расходу реагентов;
- дается сравнительная оценка технологических свойств исследуемых руд со свойствами руд известных промышленных типов, и прогнозируются показатели их отработки.

На стадии оценочных работ:

- разрабатываются критерии для минералого-технологического картирования природных типов и сортов руд;
- формируются технологические пробы (массой до 100 кг), соответствующие природным типам и сортам руд;
- выполняются лабораторные испытания технологических проб с получением ПР, разрабатываются общие схемы извлечения ПК из растворов;
- определяются технологические параметры для выделения технологических типов и сортов руд;
- разрабатывается регламент проведения натуральных опытных работ;
- определяются рациональные схемы проведения процесса КВ с выдачей исходных данных для технико-экономической оценки отработки руд и рентабельность предприятия.

На стадии разведочных работ (включая эксплуатационную разведку) проводятся:

- геотехнологическое опробование с формированием укрупненных технологических проб (массой до 20–40 т);
- картирование по геотехнологическим типам или сортам руд;
- опытно-промышленные натурные работы по переработке выделенных промышленных технологических типов руд. КВ с циклом рудоподготовки, формированием рабочего штабеля, переделом технологических растворов и получением товарных продуктов.

Методические рекомендации предназначены для использования геологическими, горнодобывающими и проектными организациями при оценке возможности рентабельной переработки бедных окисленных медных руд комплексного состава способом кучного выщелачивания (в процессе геологоразведочных работ).

Применение настоящих Методических рекомендаций обеспечит получение геолого-технологической информации, полнота и качество которой достаточны для принятия решений о проведении дальнейших разведочных работ или о вовлечении запасов разведанных месторождений в промышленное освоение.

## **2. ОСНОВНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ МЕДИ РОССИИ, СОДЕРЖАЩИЕ БЕДНЫЕ ОКИСЛЕННЫЕ РУДЫ КОМПЛЕКСНОГО СОСТАВА**

В настоящее время выделяется шесть основных промышленных типов месторождений меди (объекты России).

**Сульфидные медно-никелевые месторождения**, генетически связанные с дифференцированными массивами ультраосновных и основных магматических пород (Норильская и Печенгская группы месторождений).

**Месторождения медистых песчаников и сланцев**, приуроченные к пестроцветным формациям складчатых областей (Удоканское).

**Медноколчеданные (медные и медно-цинковые) месторождения**, связанные в основном с дифференцированными формациями базальтоидного магматизма (Учалинское, Ново-Учалинское, Гайское, Подольское, Урупское, Кызыл-Дере).

**Меднопорфировые месторождения**, пространственно и генетически связанные с малыми интрузиями и телами субвулканических порфировых пород умеренно кислого состава (Михеевское, Томинское).

**Скарновые медные месторождения**, генетически связанные с дифференциатами габбро-диорит-гранодиоритовой и гранодиорит-сиенитовой формаций (Турьинская группа).

**Кварцево-сульфидные (жильные) месторождения**, образовавшиеся в результате выполнения трещинных структур или метасоматического замещения гранитоидных и вулканогенных вмещающих пород.

Большинство месторождений меди являются комплексными, в которых имеется большое число сопутствующих компонентов. Медным рудам

сопутствуют: Zn, Mo, Ni, Co, Pb, Fe, S, Au, Ag, Cd, Os, Se, Re, Te, In, Bi, Ge, Sb. К медным месторождениям с комплексным составом руд относятся: медно-никелевые, медно-молибденовые, медно-золотые.

Для всех промышленных типов сульфидных руд меди технология переработки включает их обогащение. Окисленные медные руды комплексного состава обогащаются значительно хуже, чем сульфидные и относятся к категории упорных. При обогащении комплексных руд теряется до 30–50 % цветных металлов.

В существенных количествах окисленные руды присущи для трех промышленных типов: медноколчеданного; меднопорфирового и скарнового.

Для **медноколчеданных** месторождений характерно наличие зоны окисления, которая в классическом виде имеет три этажа (сверху – вниз):

– «железная шляпа», представляющая собой скопления бурого железняка, где главными минералами являются гидроксиды и оксиды железа с незначительными количествами малахита; как правило, обогащены золотом и серебром;

– окисленные, так называемые упорные руды, где более 50 % минералов представлены оксидными соединениями — малахитом, азуритом, хризоколлой и др.; эти руды плохо поддаются обогащению;

– зона вторичного сульфидного обогащения, представленная халькозином, купритом и др.; это, как правило, богатые, легкообогащаемые руды.

Для **меднопорфировых** месторождений характерной чертой является вторичная вертикальная зональность; обычно имеющая до пяти зон (сверху – вниз): выщелачивания; окисленных руд; смешанных руд; вторичного сульфидного обогащения и первичных руд.

В приповерхностных частях **скарновых** месторождений развиваются процессы карстообразования и окисления сульфидных руд.

Отечественные горные предприятия ежегодно складировуют на поверхности около 5 млрд тонн вскрышных и отвальных отходов. Примерно 700 млн тонн поставляют в отвалы обогатительные фабрики (ОФ).

Отходы горных предприятий, образовавшиеся при добыче и переработке руд, в результате складирования забалансовых медных руд, медьсодержащих отходов обогатительного (пиритный концентрат, хвосты) и металлургического (шлаки, шламы, кеки) процессов, которые в количественном и качественном отношении могут стать предметом промышленной разработки, представляют собой «техногенные месторождения» меди. В категорию месторождения техногенное образование может быть переведено только в случае его положительной технико-экономической оценки в результате геологоразведочных работ и апробации запасов ГКЗ.

Техногенные месторождения можно разделить на два класса:

– техногенные залежи природных полезных ископаемых (отвалы горнодобывающих предприятий, сформированные извлеченными из недр,



перемещенными и складированными вскрышными горными породами, некондиционными рудами);

– техногенные залежи продуктов переработки промышленных руд (отходы обогащения руд, хвосты обогатительных фабрик).

Состав и строение техногенных месторождений зависят от геолого-промышленного типа исходного природного месторождения, способа добычи и технологии обогащения и переработки минерального сырья, а также от условий и сроков хранения отходов (лежалые, текущие). Как и природные месторождения полезных ископаемых, техногенные месторождения имеют определенную структуру распределения полезных компонентов, зоны вторичного обогащения, окисления, но, в отличие от природных, обычно характеризуются низкими содержаниями ПК.

Для кучного выщелачивания в РФ пригодны окисленные медные и комплексного состава руды месторождений, а также их складированные забалансовые руды и отходы работы обогатительных фабрик. К рудам комплексного состава относится минеральное сырье не только по набору извлекаемых селективно продуктов (более одного), но и руды с ценными изоморфными примесями в них (а также твердые растворы). В составе этих руд и отходов в значимых количествах содержатся, кроме меди: золото и серебро; никель и кобальт; цинк и свинец; молибден, вольфрам, висмут, сурьма.

Общее количество отходов обогащения медных руд только на уральских предприятиях превышает 200 млн т, текущее образование отходов ОФ составляет около 6,5 млн т в год. Доля их использования в целях доизвлечения меди в настоящее время в РФ не превышает 3 %.

### **3. ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ВОЗМОЖНОСТЬ ОТРАБОТКИ ОКИСЛЕННЫХ МЕДНЫХ РУД КОМПЛЕКСНОГО СОСТАВА СПОСОБОМ КУЧНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ**

Объектами, пригодными для отработки способом КВ являются руды месторождений различных генетических типов, полезные компоненты которых могут быть переведены в раствор с последующим получением ликвидных товарных продуктов.

Благоприятные геотехнологические условия освоения месторождения способом КВ определяются природными факторами, которые существенным образом влияют на возможность его применения, ход и результаты.

Характеристики геологических природных факторов (проницаемости, гранулометрического состава руд, содержания полезных компонентов в руде и т.п.) не позволяют объективно спрогнозировать ход и результаты отработки способом КВ конкретного рудного объекта. Качественная оценка природных факторов обеспечивает возможность интерполяции результатов опытных технологических работ на всё месторождение или на его часть в соответствии с принципом аналогии. Количественная оценка, необходимая

для проектирования горного предприятия, может быть получена только по результатам натуральных опытных работ.

Географо-экономические факторы оцениваются по общепринятым методикам. Основные особенности техногенных месторождений:

- расположение в освоенных районах;
- поверхностное залегание;
- горная масса месторождений преимущественно дезинтегрирована;
- сложность технологического извлечения полезных компонентов;
- снижение прочности пород, обусловленное предшествующим ведением горных работ;
- разработка техногенных объектов не требует изъятия земель из хозяйственного оборота.

Естественно, процессу КВ способствуют благоприятные климатические условия — сухость климата и положительная среднегодовая температура в районе. Нахождение месторождений в регионах с продолжительным периодом низких температур и сложным рельефом местности относят к технологическим рискам при использовании способа КВ. Тем не менее, в настоящее время в мире работают более 70 проектов в зонах с арктическим и субарктическим климатом.

Основными геологическими факторами, определяющими возможность и целесообразность применения способа КВ, являются вещественный состав руд и их водно-физические свойства.

### **3.1. Вещественный состав окисленных медных руд и его влияние на процесс КВ**

Природными факторами, в разной степени определяющими технологические свойства полезного ископаемого, являются:

- содержание основного и попутных полезных компонентов;
- минеральный состав основного и попутных ПК;
- гранулометрическая характеристика минералов;
- содержание и минеральные формы «вредных примесей»<sup>1</sup>;
- вещественный состав рудовмещающих (разубоживающих) пород;
- изменчивость вещественного состава полезного ископаемого.

По содержанию меди руды в настоящее время разделяются на:

- весьма богатые с содержанием меди более 3 %;
- богатые, содержащие более 2 % меди (для руд медно-порфировых месторождений — более 1 %);
- среднего качества (рядовые) с содержанием меди более 1 % (для руд меднопорфировых месторождений — более 0,4 %);
- бедные, содержащие от 0,5 до 1 % меди (для руд меднопорфировых месторождений — менее 0,4 %).

---

<sup>1</sup> «вредные» примеси — условно вредные (As, Pb, Tl, Mn, Cr, U, Th, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, S), так как для другого производства (предприятия) они являются полезными

По степени окисления руды медных месторождений подразделяются на первичные (сульфидные), смешанные и окисленные. Критерием для отнесения руд к тому или иному типу служит содержание меди в оксидной форме: для сульфидных руд — до 10 %; смешанных — 11–50 %; окисленных — более 50 % (для каждого месторождения эти цифры уточняются в процессе технологических исследований). Так, для Удоканского месторождения: к сульфидным относятся руды, содержащие до 30 % окисленных минералов меди, к смешанным — 31–70 % и к окисленным — более 70 % [1].

В рудах комплексного состава, кроме меди, промышленное значение могут иметь другие металлы (никель, свинец, цинк, молибден, железо, олово, рений, германий, кадмий, вольфрам, золото, висмут, скандий, селен).

Из большого количества медьсодержащих минералов первичных руд промышленное значение имеют 15. Причем на четыре сульфидных минерала меди — халькопирит, борнит, халькозин и кубанит приходится около 90 % мировых запасов и добычи меди. Промышленно значимые минералы меди, входящие в состав окисленных медных руд, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Промышленные медьсодержащие минералы окисленных руд

| Минерал         | Химическая формула                                | Содержание ПК, % |
|-----------------|---------------------------------------------------|------------------|
| Халькопирит     | $\text{CuFeS}_2$                                  | 34,6             |
| Борнит          | $\text{Fe}_2\text{S}_3 \cdot \text{Cu}_2\text{S}$ | 63,3             |
| Кубанит         | $\text{CuFe}_2\text{S}_3$                         | 23,4             |
| Ковеллин        | $\text{CuS}$                                      | 66,5             |
| Халькозин       | $\text{Cu}_2\text{S}$                             | 79,8             |
| Малахит         | $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$      | 57,4             |
| Азурит          | $2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$     | 55,3             |
| Хризоколла      | $\text{CuSiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$        | 32,8–40,3        |
| Брошантит       | $\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$     | 56,2             |
| Атакамит        | $\text{CuCl}_2 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$     | 59,5             |
| Куприт          | $\text{Cu}_2\text{O}$                             | 88,8             |
| Тенорит         | $\text{CuO}$                                      | 79,9             |
| Самородная медь | $\text{Cu}$                                       | 88–100           |

\* часть минералов содержит в качестве примеси Mn, Ge, Cd, Re

В окисленных рудах из рудных минералов существенно преобладают оксиды и гидроксиды железа, содержащие в своем составе значительные количества металлов в сорбированной и изоморфной формах.

В таблице 2 приведены минералы-носители попутных ПК, представляющие практический интерес, в окисленных медных рудах комплексного состава.

## Минералы-носители попутных полезных компонентов в окисленных медных рудах

| Минерал                     | Химическая формула                                                         | Содержание ПК, %      |
|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| Самородное золото, электрум | (Au, Ag)                                                                   | 4–15 (Ag)<br>>15 (Ag) |
| Ферримолибдит               | $\text{Fe}_2(\text{MoO}_4)_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$                    | $\text{MoO}_3$ 57–61  |
| Повелит                     | $\text{CaMoO}_4$                                                           | $\text{MoO}_3$ 57–61  |
| Ильземаннит                 | $\text{Mo}_3\text{O}_8 \cdot n\text{H}_2\text{O}$                          | $\text{MoO}_3$ до 74  |
| Ревдинскит                  | $(\text{Ni, Mg})_6(\text{OH})_8[\text{Si}_4\text{O}_{10}]$                 | NiO до 40             |
| Церуссит                    | $\text{Pb}[\text{CO}_3]$                                                   | PbO 77,5              |
| Англезит                    | $\text{Pb}[\text{SO}_4]$                                                   | PbO 68,3              |
| Смитсонит                   | $\text{Zn}[\text{CO}_3]$                                                   | ZnO 52,0              |
| Монгеймит                   | $(\text{Zn, Fe})[\text{CO}_3]$                                             | ZnO 20–30             |
| Виллемит                    | $\text{Zn}_2[\text{SiO}_4]$                                                | ZnO 73,0              |
| Каламин                     | $\text{Zn}_4(\text{OH})_2[\text{Si}_2\text{O}_7] \cdot \text{H}_2\text{O}$ | ZnO 67,5              |

Хвосты обогащения медноколчеданных руд в основном представлены материалом хвостохранилищ горно-обогатительных комбинатов. Материал измельчен и отличается высоким влагосодержанием (до 20–50 %), высоким содержанием глинистых частиц (до 50 %) при плотности 1,5–2,5 т/м<sup>3</sup>. Хвосты флотации представлены преимущественно пылевидным материалом (не менее 25 % частиц с диаметром менее 0,1 мм), хвосты гравитационного обогащения — мелкозернистым материалом (не более 25 % таких частиц). Хвосты флотации медноколчеданных руд содержат 0,16–0,35 % Cu, 0,2–0,8 % Zn и другие ценные компоненты. Основными рудными минералами хвостов являются сульфиды: пирит (до 70 % масс.), халькопирит, сфалерит, халькозин, ковеллин. Медь и цинк сконцентрированы в тонкой фракции хвостов (–0,010 мм): например, в хвостах Учалинского ГОКа содержание Cu составляет 0,76–0,83 %, содержание Zn — 2,19–2,46 % при содержании 26–27 % S. В крупной фракции (+0,010 мм) содержание Cu снижается до 0,37–0,40 %, содержание Zn — до 0,83–1,13 % при содержании до 42 % S, но при этом в данной фракции сконцентрировано до 43,9–60,8 % Cu и до 56,8–59,2 % Zn.

Изучение вещественного состава руд и вмещающих пород должно проводиться по методикам, утвержденным научными советами по минералогическим и аналитическим методам исследований (НСОММИ, НСАМ). Минеральный состав природных типов и сортов руд, их текстурно-структурные особенности и физические свойства должны быть изучены с применением минералого-петрографических, физических, химических и других видов анализов. Химический состав руд должен изучаться с полнотой, обеспечивающей выявление всех основных и попутных полезных компонентов, «вредных» примесей и шлакообразующих компонентов. Содержания их в руде определяются анализами проб химическими, спектральными, физическими, геофизическим или другими методами [1].

В отличие от простого растворения (обратимого процесса) химическое растворение (разложение) сопровождается изменением растворителя и растворяемого вещества как химических соединений. В случае полного растворения минерала (конгруэнтного) осуществляется перевод всех компонентов твердого вещества в растворимые соединения, а в случае частичного растворения (инконгруэнтного) остаточная твердая фаза состоит из нерастворенных компонентов минерала. Реакция взаимодействия исходного материала с растворителем в случае химического растворения продолжается до полного исчезновения одного из реагирующих веществ. Количество растворенного вещества (степень растворения) при химическом разложении, в большинстве случаев, определяется продолжительностью взаимодействия и условиями, в которых ведется процесс. Поэтому многие таблицы «по растворимости минералов» содержат качественную оценку (хорошо-плохо, сильно-слабо, быстро-медленно растворим). Существенные расхождения в оценках зависят от профессиональной специфики (минералог, технолог, геотехнолог) составителей таблиц. Под «растворимостью минерала» обычно имеют в виду лишь возможность полного или частичного растворения в определенных условиях.

Окисленные руды меди не бывают мономинеральными. Обычно полезные компоненты распределены по нескольким минералам, часто имеющим различные химические свойства. Также различно их отношение к растворителям. Поэтому необходима количественная оценка распределения извлекаемых компонентов по минеральным группам с одинаковыми или близкими химическими свойствами. Эта сложная задача решается с помощью методов химического фазового анализа. Нередко исследователям приходится самим разрабатывать метод фазового анализа применимый к конкретным рудам и конкретным условиям отработки. Вводятся такие понятия как «кислоторастворимая медь» и, помимо общего содержания ПК, определяется количество ПК, максимально извлекаемое в конкретном технологическом процессе. Это позволяет в «геологических запасах» подсчитывать и «технологические» или «извлекаемые запасы» под выбранную конкретную технологию переработки.

В таблице 3 приведены литературные данные о взаимодействии рудных минералов окисленных медных руд комплексного состава с применяемыми на производстве выщелачивающими растворами.

Выщелачивание Cu и попутных элементов-примесей (в первую очередь Au и Ag) из окисленных медных руд комплексного состава может проводиться различными реагентами и в различных вариантах метода (агитационное (чановое) выщелачивание, кучное выщелачивание, бактериальное выщелачивание).

Поведение рудных минералов окисленных комплексных руд  
в выщелачивающих растворах

| Минерал                     | Возможность перевода полезного компонента в раствор                                                       |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Халькопирит                 | растворим в азотной кислоте, на земной поверхности неустойчив, переходит в кислородные соединения Cu и Fe |
| Борнит                      | растворим в соляной и азотной кислотах                                                                    |
| Кубанит                     | растворим в азотной кислоте, на земной поверхности неустойчив, переходит во вторичные минералы Cu и Fe    |
| Ковеллин                    | легко растворим в серной кислоте, при окислении переходит в сульфаты, затем в окислы                      |
| Халькозин                   | легко растворим в серной кислоте, на земной поверхности переходит в куприт и самородную медь              |
| Малахит                     | очень легко растворим в серной кислоте                                                                    |
| Азурит                      | очень легко растворим в серной кислоте                                                                    |
| Хризоколла                  | легко растворима в серной кислоте                                                                         |
| Брошантит                   | растворим в серной кислоте                                                                                |
| Атакамит                    | растворим в серной кислоте                                                                                |
| Куприт                      | растворим в серной кислоте                                                                                |
| Тенорит                     | растворим в серной кислоте                                                                                |
| Самородная медь             | растворима в кислотах                                                                                     |
| Самородное золото, электрум | растворимы в растворах цианида и гипохлорита натрия                                                       |
| Ферримолибдит               | растворим в серной кислоте                                                                                |
| Повеллит                    | растворим в серной кислоте                                                                                |
| Ревдинскит                  | растворим в серной кислоте                                                                                |
| Церуссит                    | растворим в серной кислоте                                                                                |
| Смитсонит                   | растворим в серной кислоте                                                                                |
| Виллемит                    | растворим в серной кислоте                                                                                |
| Каламин                     | растворим в серной кислоте                                                                                |

Основной проблемой КВ меди является низкая скорость вскрытия упорного медноколчеданного сырья. Из всех сульфидных минералов меди наиболее упорным к выщелачиванию является халькопирит по причине образования на его поверхности пассивирующих пленок. Прямое выщелачивание хвостов и забалансовых смешанных руд осложняется и присутствием значительных количеств пирита, отличающегося низкой окисляемостью.

На сегодняшний день **единственным применяемым в мировой промышленности реагентом для КВ меди остается серная кислота** — прямое сернокислотное выщелачивание (20–25 г/л H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Разработаны многочисленные процессы окислительного выщелачивания комплексных сульфидных продуктов в сернокислой среде с применением в качестве окислителей Fe(III), кислорода, озона, пероксида водорода. Часто окисление проводится в присутствии хлорид-анионов.

Наличие большого количества смешанных и бедных сульфидных руд обусловило интенсивные исследования в области сернокислотного бактериального выщелачивания.

Бактериальное КВ меди из сульфидной руды Удоканского месторождения было успешно проведено на опытном штабеле КВ. Извлечение меди из руды за 145 суток составило 87,0 %.

Центр тяжести исследований переносится на проведение биовыщелачивания за счет ферментов, выделяемых из бактерий. Интенсивно ведется поиск и испытание новых реагентов и добавок для ускорения процесса КВ меди, методов интенсификации сернокислотного растворения меди. Самыми геотехнологически освоенными для переработки большинства руд комплексного состава являются водные растворы серной кислоты. Но её выщелачивающие растворы редко бывают избирательны по отношению к минералам-носителям полезного компонента. Растворы активно взаимодействуют и с нерудными минералами, составляющими основную часть горнорудной массы, что значительно повышает расход кислоты.

По отношению к процессу сернокислотного КВ минералы по полноте их растворения (разложения) в растворе серной кислоты (до 20–50 г/л) за реальное время отработки эксплуатационных штабелей КВ (до 1–3 лет) делятся на 3 группы:

- «полностью растворимые» («быстро растворимые» — карбонаты, гидроокислы железа, некоторые хлориты, апатит и «медленно растворимые» — биотит, вермикулит, хлориты, триоктаэдрические гидрослюда);

- «частично растворимые» (органическое вещество, монтмориллонит, каолинит);

- «практически нерастворимые» (диоктаэдрические гидрослюда, мусковит, полевые шпаты, кварц и некоторые акцессорные минералы) [2].

Недостаток и противоречивость литературных данных приводит к необходимости изучать технологические свойства минералов конкретного объекта в планируемой при отработке физико-химической обстановке. Особое внимание при изучении вещественного состава необходимо уделять распределению минералов-носителей ПК по классам крупности и их вскрываемости в зависимости от параметров процесса дробления и измельчения руд.

### **3.2. Водно-физические свойства окисленных медных руд**

Геотехнологические особенности отработки предъявляют дополнительные требования к составу и свойствам руд, что выражается в детальности изучения и испытания руд конкретного месторождения.

Проницаемость руд в штабеле определяет возможность формирования инфильтрационного потока выщелачивающих растворов. Пригодный для кучного выщелачивания рудный материал должен обладать водопроницаемостью, как в масштабе куска, так и в масштабе штабеля, для обеспечения доступа растворителя к рудному минералу. Проницаемость породы определяется наличием пористости. По значению пористости плотные кристаллические породы подразделяются на низкопористые, (пористость меньше 10 %), среднепористые — 10–20 % и высокопористые —

более 20 %. Однако степень водопроницаемости зависит не только от величины (%) пористости, но и от размера пор (пустот) и их открытости.

Литологический и гранулометрический состав выщелачиваемой горнорудной массы определяют фильтрационные свойства штабеля. При содержании глинисто-алевритовой фракции (<0,05 мм) выше 20–30 % фильтрация в породе фактически прекращается. При большом количестве в руде глинисто-алевритовых частиц в массиве штабеля приходится создавать искусственную проницаемость. Для этого проводят грануляцию рудного материала размером мельче 5 мм. Хорошие результаты дает одновременная подача в гранулятор вместе со связующим компонентом (цементом или жидким стеклом) выщелачивающего реагента — практически концентрированной серной кислоты. Полученный гранулят испытывают на длительность устойчивости при орошении под нагрузкой близкой к давлению на частицы в штабеле. Устойчивый гранулят выщелачивается совместно со всей рудной массой. Изучение гранулометрического состава руд и вмещающих пород проводится по методикам, утвержденным в ГОСТ 12536-2014 «Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава».

Важными характеристиками руд, входящими в перечень исходных данных необходимых при проектировании предприятий КВ, являются влажность, влагоемкость и водоотдача материала, слагающего штабель, приемистость штабеля, угол естественного откоса штабеля. Все эти параметры определяются для материалов различной крупности.

*Влажность* — величина, показывающая относительное содержание влаги в материале, определенное по отношению к массе сухого материала и выраженная в процентах. Влажность играет важную роль при подсчете запасов, расчете показателей отработки.

*Влагоёмкость* — способность горных пород вмещать и удерживать в порах определенное количество воды. По степени влагоёмкости горные породы подразделяются на три категории:

- весьма влагоемкие (торф, глины, суглинки);
- слабовлагоемкие (мергели, рыхлые песчаники, мелкие пески);
- невлагоемкие (изверженные и осадочные породы, галечник, гравий, крупный песок).

Величина влагоемкости используется для расчета количества раствора, зависающего в штабеле в начале процесса выщелачивания.

*Приемистость штабеля* — предельная способность поверхности штабеля пропускать (инфильтровать) подаваемый выщелачивающий раствор, измеряется в литрах на 1 м<sup>2</sup> поверхности в час

*Угол естественного откоса штабеля* — угол, образованный при свободной насыпке поверхностью рыхлой горной массы с горизонтальной плоскостью. Характеризует крутизну склонов штабеля. При увеличении высоты кучи значительно увеличивается площадь её основания, что делает практически невозможным проведение опытов по КВ на малотоннажных кучах.



Изучение водно-физических свойств руд и вмещающих пород проводится по методикам, утвержденным в ГОСТ 30416-2012 «Грунты. Лабораторные испытания. Общие положения» и ГОСТ 5180-2015 «Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик».

## **4. ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОПРОБОВАНИЕ**

### **4.1. Особенности геотехнологического опробования при способе КВ**

В разработку методики геотехнологического опробования и прогнозирования положены основные закономерности процесса КВ.

При традиционных методах гидрометаллургии время выщелачивания ограничено первыми часами, реже сутками. При КВ продолжительность возрастает от нескольких месяцев до нескольких лет. Соответственно, и продолжительность опытов при геотехнологических исследованиях значительно больше, чем при гидрометаллургических.

Второе существенное отличие — это крупность выщелачиваемого рудного материала. Скорость проникновения выщелачивающего реагента в кусок является лимитирующим показателем для процесса КВ.

Третье существенное отличие — неравномерность условий проведения выщелачивания в обрабатываемом объеме.

Изучение влияния отдельных природных и технологических факторов на показатели процесса выщелачивания необходимо для его последующего моделирования. Если геологические параметры объекта удовлетворяют существующим в настоящее время технике и технологии добычи и переработки руд методами КВ, то исследуемое месторождение признается перспективным, что служит основанием для проведения опытных работ на месторождении. Учитывая продолжительность и высокую стоимость реализации натуральных опытов, предварительно проводят исследования по определению технологических свойств руд и вмещающих пород в лабораторных условиях.

Геотехнологическое опробование — комплекс специфических исследований, направленных на получение технологических параметров, обеспечивающих количественную оценку геотехнологических особенностей руд месторождений, применительно к эксплуатации их системами кучного выщелачивания.

Изучение и контроль процесса кучного выщелачивания сопряжены с существенными трудностями получения его показателей непосредственно в активной зоне. Эти показатели достаточно надежно могут контролироваться только на входе в геотехнологическую систему и на выходе из нее.

**Выходные геотехнологические показатели** — это эмпирические показатели, подлежащие определению при опытном геотехнологическом опробовании. К ним относятся: концентрация выщелачиваемого ПК и выщелачивающего реагента в продуктивных растворах ( $C_{ПКпр}$  и  $C_{ПКвр}$ ); степень извлечения полезного компонента из недр ( $\epsilon$ ); отношение массы рабочего раствора к массе проработанных этими растворами пород

(Ж:Т или  $f$ ); удельные затраты реагента на извлечение единицы полезного компонента ( $Z$ ); реагентоемкость пород — затраты массы растворителя к массе обрабатываемой руды ( $R$ ).

Все показатели определяются при заданных исходных (входных) параметрах эксперимента: исходном содержании полезного компонента ( $C_{ПК}$ ) в выщелачиваемом материале; концентрации выщелачивающего реагента при проведении опыта (начальная, средняя); температуре; давлении; физических размерах модели; физических свойствах выщелачиваемого материала (средней крупности, объеме и массе, насыпном объемном весе, пористости, влажности).

Выходные показатели постоянно изменяются во времени. Поэтому технологические параметры определяются на заданный момент, например, на момент достижения: максимального или заданного % извлечения; минимально промышленной концентрации ПК в промышленных растворах; определенной степени проработки горнорудной массы (Ж/Т).

К основным геотехнологическим параметрам, используемым в дальнейшем для прогнозных расчетов, относятся следующие нормируемые величины выходных показателей.

Концентрация полезного компонента в продуктивных растворах ( $C_{ПК}$ ) подразделяется на: текущую ( $C_{ПК}$ ), максимальную ( $C_{ПКmax}$ ), среднюю ( $C_{ПКср}$ ), и минимальную продуктивную ( $C_{ПКпрmin}$ ).

*Максимальная концентрация* — показывает абсолютный максимум выходной концентрации ПК.

*Средняя концентрация* определяется для конкретных ситуаций: на окончание опыта; на заданный процент извлечения.

*Минимальная концентрация* полезного компонента в продуктивных растворах, как отраслевая норма, — это такая концентрация, при которой добыча геотехнологическим способом экономически оправдана. При отсутствии такой нормы можно воспользоваться величиной минимальной концентрации полезного компонента, практикуемой добывающими предприятиями.

Для полезных компонентов с неотработанным промышленностью переделом растворов можно руководствоваться величиной технологического минимума, т.е. минимальной концентрацией, при которой извлечение из раствора технически возможно.

*Степень извлечения полезного компонента* ( $\epsilon$ ) — максимальная степень извлечения, достигаемая в опыте при концентрации полезного компонента выше минимальной, отношение количества извлеченного компонента к запасам его в объеме проработки.

*Отношение Ж/Т* ( $f$ ) — отношение массы поданного в пласт раствора к массе породы в объеме проработки; величина, постоянно растущая с увеличением времени отработки.

Объем растворов, приходящийся на единицу выщелачиваемой горнорудной массы, необходимый для обеспечения достигнутой

(максимальной) в опыте степени извлечения полезного компонента из недр при концентрации полезного компонента выше минимальной.

*Удельный расход реагента (Z)* — отношение массы израсходованного реагента к количеству добытого металла.

В качестве параметра опыта принимается величина удельного расхода, соответствующая достигнутой (максимальной) степени извлечения при концентрации полезного компонента выше минимальной.

*Реагентоемкость пород (R)* — величина, равная отношению массы израсходованного реагента к массе рабочего объема вмещающих пород. Масса израсходованного реагента подсчитывается как разность между поданным в пласт и извлеченным количеством реагента.

В качестве геотехнологического параметра принимается значение реагентоемкости, соответствующее максимальной или достигаемой степени извлечения при концентрации полезного компонента выше минимально промышленной. Величина реагентоемкости в натуральных опытах по КВ рассчитывается на горнорудную массу (ГРМ), предназначенную для выщелачивания, и зависит от доли её фактически закисленного объема.

*Продолжительность процесса выщелачивания (t)* — время практически полного или заданного процента извлечения полезного компонента.

По объекту воздействия, технике эксперимента и масштабу воспроизведения процесса КВ, геотехнологическое опробование разделяется на лабораторное и натурное. Соответственно поставленным задачам отбираются разнообразные технологические пробы: частные и объединенные; лабораторные, полупромышленные и промышленные.

#### **4.2. Отбор технологических проб**

Отбор проб для технологических исследований на разных стадиях геологоразведочных работ следует выполнять в соответствии со стандартом Российского геологического общества СТО РосГео 09–001–98 «Твердые полезные ископаемые и горные породы. Технологическое опробование в процессе геологоразведочных работ», утвержденным и введенным в действие Постановлением Президиума Исполнительного комитета Всероссийского геологического общества (от 28 декабря 1998 г. № 17/6).

Технологическая проба — порция материала, отобранная механическим способом из скопления полезного ископаемого в его естественном залегании или из скопления добытого минерального сырья, предназначенная для проведения технологических испытаний.

Материал пробы может быть отобран двумя способами: путем сплошного отбора в одном месте (*сплошные пробы*) или путем составления пробы из отдельных порций, расположенных в пределах области замера (*объединенные или композитные пробы*).

Пробы, отобранные механическим способом, обладают свойством неповторимости. Каждая из них уникальна в том смысле, что она не может быть отобрана дважды. Как бы близко ни располагалась последующая проба

по отношению к предыдущей, она всегда будет характеризовать иной объем недр, вследствие чего результаты анализов (испытаний) обеих проб могут различаться.

В отличие от материальных проб, геофизические (не разрушающие) замеры свойств полезных ископаемых могут быть повторены любое число раз, это их важная особенность. В плане технологического опробования руд полиметаллов геофизические методы могут быть применимы для определения плотности, влажности, пористости и проницаемости руд.

Технологические пробы должны быть представительными тому геологическому объему, который может поступать на переработку.

На начальных стадиях изучения объекта производится оценка технологических свойств руд. Для этого стараются охватить опробованием все разнообразие природных технологических типов руд на изучаемом объекте. Из всего многообразия природных типов формируется один или несколько технологических типов руд. Технологический тип полезного ископаемого объединяет минеральное сырье, обладающее сравнительно близкими технологическими свойствами, т.е. представляет собой общность, принципиально отличающуюся от других схемой переработки, занимающую существенный объем месторождения, добычу и переработку которого можно произвести отдельно.

Для определения возможности селективной отработки технологических типов руд необходимо провести их выделение и оконтуривание на площади месторождения, т.е. выполнить минералогическое картирование. Это картирование базируется на выявленных зависимостях технологических показателей от вещественного состава руд. В случае окисленных медных руд комплексного состава визуально (по цвету, текстуре или физическому состоянию рудного материала) технологические типы различать довольно трудно. Здесь наиболее подходит тестирование руд с использованием методов химического фазового анализа, определяющего какой-нибудь контрастный технологический показатель. Лучше всего определять максимально возможное извлечение полезных компонентов в планируемый для отработки растворитель и его удельный расход. Наиболее подходит для условий тестирования метод статического выщелачивания с перемешиванием. В качестве исследуемого рудного материала можно использовать дубликаты кернового опробования руд. Во-первых, пробы привязаны к геологическому объему, во-вторых, истерты. Тонкое измельчение материала проб и интенсивное перемешивание позволяют исключить диффузионную стадию выщелачивания. Продолжительность опытов определяется экспериментально с расчетом получить максимальные для данной пробы реагентоемкость и извлечение ПК.

Выделенные объемы одного технологического типа оцениваются с позиций возможности и целесообразности селективной выемки. Если возможна селективная добыча руды по технологическим сортам или типам, то разрабатываются отдельные технологические схемы их переработки. Если

их селективная добыча невозможна, то разрабатывается единая технологическая схема.

Влияние объемов проб на количественные характеристики изменчивости содержаний различно при опробовании полезных ископаемых и пород в их естественном залегании и в рыхлых перемешанных минеральных массах.

В *добытых* и *обработанных* минеральных массах первоначальная структура полезного ископаемого нарушена. Поэтому опробуемые объемы могут рассматриваться как совокупности некоторых элементарных объемов, содержания в которых взаимно независимы и распределены статистически нормально. В этих условиях увеличение объема проб в «n» раз приводит к соответствующему уменьшению дисперсий содержаний по пробам также в «n» раз. Если суммарные объемы отобранных проб одинаковы, то практически безразлично, будет ли отобрано много проб малых объемов или ограниченное число проб больших объемов, так как дисперсия пробы объема ( $V=nv$ ) равна суммарной дисперсии «n» проб объемом «v».

При опробовании полезных ископаемых в естественном залегании, оценка влияния объемов проб на изменчивости содержаний осложняется проявлением пространственных взаимосвязей между их значениями по смежным пробам, а также анизотропией строения большинства из них. На статистические характеристики изменчивости содержаний по таким пробам оказывают влияние не только их объем, но также форма, размер и ориентировка. В отличие от случая опробования рыхлых, перемешанных минеральных масс, увеличение объемов проб «v» в «n» раз не снижает дисперсии содержаний в «n» раз. Поэтому при опробовании минерализованных коренных пород и структурных кор выветривания лучше отбирать много (не менее 30) проб малого объема, равномерно размещенных по всей опробуемой площади, чем — малое число проб большого объема.

Масса лабораторных проб забойной крупности для испытаний под метод КВ должна быть не менее:

- 1–5 кг (штуфные) для тестовых проб по разновидностям пород и руд;
- 30–100 кг для частной технологической лабораторной пробы одного петрографического состава;
- 200–500 кг для объединенных проб руд;
- от 1 до 3 т для укрупненных технологических лабораторных проб.

Лабораторные технологические пробы используются для выяснения возможных способов и принципиальных схем технологической переработки полезного ископаемого. Испытанием полупромышленных проб уточняются технологические свойства, и выбирается наиболее эффективная схема переработки минерального сырья, обеспечивающая оптимальные технико-экономические показатели технологического процесса. Переработка технологических проб в производственных условиях проводится для проверки и уточнения технологических схем и определения важнейших технико-экономических показателей.

### 4.3. Лабораторные исследования

Основное назначение лабораторных испытаний — установить возможность рентабельного в настоящее время перевода полезных компонентов из руд в растворы соответствующих реагентов в нормальных условиях проведения процесса КВ, а затем разработать и доказать техническую возможность их извлечения из ПР в виде концентратов или товарных продуктов.

Объектом изучения в лабораторных условиях является вещество природных или искусственно созданных (воссозданных) руд. По размерам и длительности реализации процесса лабораторные модели в разы уступают эксплуатационным системам кучного выщелачивания. Это обстоятельство позволяет в короткое время на небольшом количестве материала провести широкий комплекс исследований при различных параметрах технологического режима (составе и концентрации растворителя, длине пути и скорости фильтрации, температуре и т.п.). При этом доступной для изучения является не только жидкая фаза — фильтрующийся раствор, но и твердая — рудный материал на разных стадиях процесса выщелачивания. Эти преимущества лабораторных моделей позволяют решать ряд таких практических вопросов, как выбор и концентрация растворителя и окислителя, изучение влияния на процесс отдельных факторов, делают их удобными для математического описания. В то же время проявление «масштабного эффекта» существенно затрудняет возможность прямой экстраполяции большей части данных, полученных при лабораторном моделировании, на реальные объекты КВ.

Лабораторные исследования всегда предшествуют натурным, они проводятся на объектах различной степени разведанности, позволяют охватить изучением большие площади, проводить сравнительный анализ технологических свойств руд.

Основными целями лабораторных испытаний являются: установление принципиальной возможности достижения промышленных концентраций металла в продуктивных растворах; степени извлечения его из руд инфильтрационным или инфильтрационно-диффузионным выщелачиванием; определение направления дальнейших технологических исследований в натуральных условиях или бесперспективности руд месторождения для отработки способом КВ. Положительное или отрицательное заключение необходимо увязать с результатами изучения химического и минерального составов руд, их структурных и текстурных особенностей, что достигается путем определения величин геотехнологических параметров для основных сортов и/или типов руд.

Первоначально, исходя из вещественного состава руд, выбирается группа возможных реагентов для выщелачивания. Затем опытным путем устанавливается наиболее рентабельный, технологичный и экологичный реагент. Затем подбираются режимы его применения, намечаются пути переработки продуктивных растворов.

При лабораторных технологических исследованиях применяются два основных метода: статическое выщелачивание и инфильтрационное выщелачивание.

### ***Статическое выщелачивание руд для изучения процесса КВ***

Целью лабораторных испытаний руд по схеме статического выщелачивания является подбор состава и рецептуры выщелачивающих растворов для натуральных опытов, получение характеристики выщелачивания полезных компонентов растворами определенного состава, в качестве которой служит показатель степени извлечения ( $\epsilon$ ).

Метод статического выщелачивания используется на самых ранних стадиях разведки, для оценки принципиальной возможности извлечения ПК из руд изучаемого месторождения и определения максимально возможных его значений по разновидностям руд и классам крупности.

Лабораторные испытания в статическом варианте можно рассматривать как экспресс-метод, который не требует больших затрат и не относится к трудоемким, но позволяет охарактеризовать значительную площадь месторождения. На основании полученных результатов, можно определить критерии ранжирования геотехнологических типов руд и провести их картирование в плане и разрезе.

Изначально рекомендуется проводить статические опыты в четырех вариантах:

1. На истертом материале (фракция крупностью  $-0,074$  мм) в агитационном режиме для определения максимально возможного извлечения в раствор полезного компонента из рудных минералов в заданных условиях выщелачивания. Интенсивное перемешивание и тонкий размер частиц позволяют практически полностью исключить диффузионную составляющую процесса выщелачивания. Продолжительность опытов редко превышает одни сутки.

2. На материале крупностью  $-5$  мм для определения максимально возможного извлечения ПК из руды данного состава («по руде») в условиях статического выщелачивания. Для сопутствующих компонентов в данных условиях определяется «извлекаемая продуктивность». Рекомендуемое время опыта до 7–10 суток.

В данном и последующем вариантах перемешивание осуществляется один раз в сутки.

3. На куске (грануле) разного размера (например  $-5$ ,  $-10$ ,  $-20$ ,  $-40$ ,  $-70$  мм) до прекращения роста концентраций ПК в продуктивном растворе. Опыт может продолжаться до нескольких месяцев. Изучается диффузионная составляющая процесса выщелачивания.

4. На 20–30 кусках размером 40–70 мм каждый месяц отбирают по 3 куска, распиливают каждый на 4 части и изучают скорость образования в куске выщелоченной зоны.

Первый вариант, проводимый в одинаковых (стандартных) условиях, можно использовать для тестирования и сравнения руд разного минерально-технологического типа.

Статическое выщелачивание проводится при довольно высоком отношении Ж/Т от 5 до 10, что позволяет проводить выщелачивание при практически не изменяемой концентрации реагента.

Статическое выщелачивание можно проводить в двух режимах:

– статическом (полностью) — когда раствор не меняется все время опыта. Обычно применяется на рудах с низкой реагентоемкостью, при невысоких концентрациях солевого состава в ПР;

– статико-динамическом — когда раствор периодически заменяется новым. Применяется при: высокой реагентоемкости руды; возможности выпадения в осадок растворенных компонентов; адсорбции металлов или установления сорбционного равновесия.

Опробование в статических условиях довольно быстро дает ответ о пригодности руды для кучного выщелачивания. Ответ положительный, если руда хорошо выщелачивается при крупности –5 мм или крупнее. При этом легко получить информацию об извлечении металла из каждого класса крупности, о кинетике извлечения и о необходимом расходе реагентов. Ситовой анализ кеков (хвостов) показывает остаточное содержание металла по классам крупности и характеризует степень измельчения выщелачиваемого материала руды в ходе опыта, необходимую степень измельчения исходной руды для раскрытия ПК. Если требуется тонкое истирание (до –0,1 мм), то руда, вероятно, непригодна для кучного выщелачивания.

При испытаниях руд комплексного состава подбор концентрации единого реагента в выщелачивающем растворе производится по основному полезному компоненту, а при наличии альтернативных растворителей — по наилучшему результату для основного и попутных компонентов.

### ***Инфильтрационное выщелачивание руд для изучения процесса КВ***

Процессы КВ развиваются по схеме подвижных физико-химических барьеров с чередованием во времени и пространстве растворения и осаждения полезного компонента. Сущность испытаний заключается в прохождении растворителя через образец с известным содержанием металла, а затем в фиксации динамики выноса металла и выхода растворителя в фильтрующемся растворе — получение «выходных кривых». В отличие от статического выщелачивания при фильтрационных испытаниях воспроизводится подвижный контакт взаимодействующих фаз, что представляет более близкую имитацию реального процесса. Это позволяет определять с помощью инфильтрационных опытов основные геотехнологические характеристики  $S_{ПКпр}$ ,  $\epsilon$ , Ж/Т, Z, R.

В процессе КВ в штабеле присутствуют все 4 гидродинамических режима движения раствора: фильтрационный; инфильтрационный; перколяционный и фильтрационно-инфильтрационный. Инфильтрационный — основной режим при КВ, характеризуется нарушением сплошности потока выщелачивающего реагента. Раствор только смачивает или покрывает тонкой пленкой поверхности кусков.



Опыты по инфильтрационному выщелачиванию, непосредственно моделирующему сам процесс КВ, проводятся в вертикальных колонках (перколяторах). Диаметр колонок зависит от крупности выщелачиваемого материала. Для уменьшения влияния пристеночного эффекта отношение диаметра колонки к размеру куска должно быть не менее 6.

Первичные опыты по инфильтрационному выщелачиванию ставят в небольших колонках из оргстекла диаметром 100–120 мм и длиной не менее 1 м, для уточнения величины степени извлечения, изучения кинетики инфильтрационного выщелачивания и расхода реагентов. Фильтрационные опыты проводятся обычно на пробах, объединенных из частных проб с одинаковыми технологическими результатами статических опытов.

Опыты осуществляют путем загрузки материала в колонку и подачи выщелачивающего раствора в верхнюю часть колонны перистальтическим насосом круглосуточно со средней плотностью орошения 6–12 л/м<sup>2</sup>×час (0,003 л/с на 1 м<sup>2</sup>) или 60–120 мл/час на колонку. Подача выбирается исходя из фильтрующей способности материала и применяемой на реальных объектах КВ. **Удельная подача растворов** на орошение (л/м<sup>2</sup>×час) является важным параметром проведения процесса КВ [3].

Количество подаваемого реагента учитывается показателем удельной подачи  $\lambda$ , выраженным в л/т в сутки. Повышение удельной подачи растворов позволяет сократить до 50 % время выщелачивания до планового извлечения без повышения удельного расхода реагента и отношения Ж/Т. Для определения рациональной удельной подачи проводят параллельные опыты на руде установленной крупности с принятой концентрацией реагента при различных значениях  $\lambda$ .

Выщелачивающий раствор просачивается через слой руды и собирается в сборник продуктивного раствора. Ежедневно его объем измеряют, анализируют содержание в нем выщелоченных металлов, реагента, замеряют рН и Eh (по общепринятым методикам анализа раствора). Накопленный продуктивный раствор используют для отработки извлечения полезных компонентов и очистки вод от загрязняющих веществ. Возможно 2 варианта ведения выщелачивания: первый — с извлечением ПК, доукреплением маточных растворов и возвращением их на выщелачивание; второй — предусматривающий нейтрализацию и вывод раствора из цикла. В этом случае для выщелачивания готовят свежий раствор.

Процедуру выщелачивания продолжают, пока кривая скорости выщелачивания не приобретет асимптотический характер или концентрация металла в ПР не станет ниже минимальной промышленной концентрации. После завершения орошения пробу руды в колонне промывают водой (не менее 1,5–2 поровых объемов) с обезвреживанием растворов, после чего извлекают из колонны и сушат на воздухе. Затем анализируют остаточное содержание полезного компонента из всего объема пробы или отдельно по классам крупности. При большой высоте колонны (более 1,5 м) кек выщелачивания опробуют и анализируют по секциям: верх, середина, низ колонны. Полученные в этой серии экспериментов результаты позволяют

оценить пригодность данной руды для КВ, величину извлечения ПК в ПР, расходы реагентов.

Высокие колонны (до 4–6 м) применяются для изучения работы планируемого слоя штабеля, испытания устойчивости гранул, получения достаточного количества продуктивного раствора. При диаметре колонны 10 см для ее загрузки на 1 м колонны требуется не менее 10–12 кг руды, а при диаметре 15–20 см масса загрузки на 1 м высоты увеличивается от 26–30 до 45–50 кг.

Если пригодность руды для КВ доказана, переходят к детальным опытам на больших лабораторных пробах. В опытах используются навески руды от 200 до 1500 кг. Основными задачами данного этапа технологических работ являются определение рациональной крупности кусков руды, уточнение времени выщелачивания, расхода реагентов при принятой крупности кусков, степени извлечения металлов.

Установление оптимальной крупности кусков можно осуществлять двумя путями. Первый путь предусматривает проведение исследования на руде одной крупности, второй — на руде разной крупности. В первом случае затраты меньше, но длительность эксперимента больше. Во втором случае результаты получаются быстрее, но затраты больше.

Для менее дорогих экспериментов выбирают примерно среднюю крупность руды –50 мм. Пробу класса –50 мм выщелачивают в большой колонне. Колонну можно составить из полиэтиленовых бочек, поставленных друг на друга. Это упрощает процесс разборки и опробование выщелоченного материала. После завершения выщелачивания проводят ситовой анализ, определяют остаточное содержание металла в разных классах крупности и устанавливают оптимальную крупность руды. Новую навеску руды дробят до этой крупности, после чего по той же методике выщелачивают в колонне. Поскольку выщелачивание в колоннах проводят последовательно, время получения конечного результата, по крайней мере, удваивается.

Если время проведения технологических исследований ограничено, реализуется более дорогостоящий второй вариант. Одновременно выщелачивают 4–6 проб руды разной крупности. Затем также проводят ситовой анализ для уточнения оптимальной крупности. Время получения конечного результата такое же, как для одной пробы, но затраты возрастают в 2–3 раза.

На стадии детальных исследований устанавливают закономерности движения выщелачивающего раствора внутри инфильтрационного потока для расчета плотности и сетки точечных источников орошения, изучают динамику массообменных процессов в стадии формирования продуктивного раствора, солевой состав, оценивают изменения фильтрационных свойств и продолжительности процесса в зависимости от высоты орошаемого штабеля рудной массы. Извлечение металлов из продуктивных растворов исследуется методами осаждения и сорбции.

Глинистый материал, входящий в состав пород, или обломки тонких классов, образующиеся при дроблении, могут нарушать проницаемость локальных участков штабеля, вести к неравномерной по сечению фильтрации. Такие руды (или отсев фракции –5 мм) в процессе рудоподготовки рекомендуется гранулировать. Необходимость грануляции определяют после проведения серии опытов. Уже на стадии статических опытов следует обратить внимание на: наличие глинистых руд; скорость водоотдачи и проницаемость (фильтруемость) кеков. В инфильтрационных опытах (на колоннах) необходимо фиксировать образование излишков мелочи, просачивание раствора по каналам, оценить влажность хвостовых продуктов. Принято считать, что, если руду необходимо дробить до размера –20 мм и тоньше, то грануляция необходима, даже если исходного глинистого материала мало или он отсутствует.

Полученные гранулы испытывают на физическую и химическую устойчивость, замачивая их в воде и выщелачивая реагентами под давлением равным весу лежащих в штабеле сверху пород. В случае устойчивости гранул, процесс грануляции считается качественным, и по описанной выше методике можно готовить гранулы на технологические опыты [4]. Гранулярный состав полученного материала содержит данные о размере получаемых гранул, их окатанности, устойчивости к замачиванию в различных реагентах в течение процесса выщелачивания, углах естественного откоса.

В отличие от процесса СПВ для кучного выщелачивания в лабораторных условиях можно получить данные соответствующие реальному процессу КВ.

В Приложении 1 в качестве примера приводятся лабораторные работы, выполненные сотрудниками ФГБУ «ВИМС», по разработке оптимальной схемы КВ меди и молибдена из окисленных комплексных Cu-Mo руд Сорского месторождения (Красноярский край).

#### **4.4. Натурные опытные работы**

Испытания малых и больших технологических проб руд, предусматриваемые уже на стадии 3 «Оценочные работы» могут быть проведены в натурных условиях. Натурные опыты позволяют получить наиболее надежную информацию о влиянии природных факторов на результаты геотехнологического процесса, однако им свойственны и некоторые недостатки:

- большая стоимость и длительность их проведения;
- трудности управления процессом из-за «инерционности» отклика и трудности интерпретации выходных данных в случае изменения режима;
- невозможно задавать различные значения факторов и, следовательно, установить влияние каждого из них.

Поэтому для уточнения роли природных факторов широко применяется метод, основанный на обработке опытных данных при эксплуатации аналогичных месторождений и залежей. Он заключается в

установлении аналогии между участками или месторождениями путем сравнения критериев геологического подобия. Результаты эксплуатации по отдельным участкам обрабатываются в удобном для сравнения виде. Находят участок с наиболее близкими показателями и по результатам его отработки осуществляют прогнозирование.

Для проведения опытных работ необходимо разработать их регламент и определить исходные данные для проектирования опытного участка. Технологический регламент разрабатывается на основе результатов проведенных лабораторных геотехнологических исследований по всем переделам технологического процесса согласно «Положению об исходных данных для проектирования промышленных предприятий», утвержденному заместителем министра промышленности, науки и технологии РФ 30.01.2002 г. и «Положению о технологическом регламенте на предприятиях химического комплекса», утвержденному заместителем министра экономики 06.05.2000 г.

Проектирование опытных работ и согласование проекта в разрешительных территориальных органах Ростехнадзора осуществляется специализированной организацией.

Стадию натуральных испытаний осуществляют либо в колоннах диаметром 1,5–2 м, либо на экспериментальном штабеле с массой руды 5–10 тыс. т. Высота штабеля (колонны) должна соответствовать высоте промышленного штабеля или же высоте первого слоя, если планируется многократное наращивание слоев.

Опыты в колонне более экономичны и предпочтительнее, если не проводят опыты с большим по массе штабелем (от 10–50 тыс. т). Выщелачивание в колонне осуществляют на материале выбранной крупности массой 20–40 т. Эти опыты легко контролируются во время выщелачивания, и отбор проб руды после выщелачивания не требует больших затрат. Колонны можно формировать из железобетонных колец, предназначенных для колодцев, изнутри покрываемых реагентостойчивой мастикой [5]. Получаемые технологические показатели весьма надежны, их можно использовать для прогноза эксплуатационных затрат КВ. Все оборудование можно легко транспортировать и использовать неоднократно. Основным недостатком этих опытов — небольшой объем пробы руды (20–40 т) не гарантирует представительности для всего месторождения. Нельзя получить данные о реальном расходе реагента, стабильности штабеля, зонах с нарушенной инфильтрацией.

С другой стороны, в малом (до 5 тыс. т) по массе штабеле тоже трудно получить надежные данные, так как значительная часть (около 35 % при высоте штабеля 4 м) руды располагается на углах естественного откоса, где извлечение ниже, чем на плоской поверхности штабеля.

Положительные моменты проведения испытаний КВ на штабеле:

- используется более представительный объем руды;
- имитируются все условия промышленной отработки;

– более надежно определяются показатели извлечения полезных и «вредных» компонентов и расход реагентов;

– получают данные о равномерности орошения и просачивания, миграции рудной мелочи, стабильности штабеля;

– получают данные о реабилитационных работах на штабеле, количество и состав растворов, используемых для обеззараживания выщелоченного материала, состав и количество твердых и жидких отходов.

Полупромышленные испытания на штабелях следует проводить на крупных месторождениях (десятки-сотни млн т ГРМ) и особенно там, где требуется длительный период выщелачивания крупнокусковой руды (–75 мм и более).

Основными недостатками проведения испытаний КВ на штабеле являются:

– необходимость получения многотонной пробы, которая может оказаться непредставительной;

– проведение определенного объема строительных и монтажных работ;

– трудоемкость контроля и управления процессом;

– необходимость демонтажа и удаления штабеля после завершения работ.

К элементам эксплуатации опытного участка следует отнести опробование и обслуживание. Частое опробование исходного материала требуется на стадиях дробления или отсыпки штабеля. Для штабеля в 5 тыс. т следует отбирать не менее 50 отдельных проб. Опробование выщелоченного штабеля обычно осуществляют путем проходки шурфов. Чтобы судить о максимальном извлечении из руды полезного компонента, необходимо отобрать пробу из нижней части штабеля, как наиболее проработанной выщелачивающими растворами. Анализы продуктивного и маточного (после извлечения металла) растворов производят из суточного объема; когда это необходимо, частоту отбора увеличивают. Пробы из пикетов наблюдения вокруг площадки используют для контроля за возможным просачиванием технологических растворов через основание штабеля. Опробование растворов на входе и выходе из сорбционных колонн обычно осуществляют из суточной пробы.

Сравнение результатов лабораторных, опытных и промышленных работ показало, что время необходимое для достижения одного и того же извлечения с увеличением масштаба опыта возрастает. Практикой работ установлено, что с увеличением объема штабеля труднее и сложнее осуществлять контроль и наблюдение за основными параметрами КВ: скоростью орошения, потерями за счет испарения и утечки рабочих растворов, извлечением ПК, расходом реагентов.

Для принятия обоснованного решения следует провести надлежащее количество экспериментов с целью получения исчерпывающей информации, особенно когда первые результаты о пригодности руды для КВ были не столь однозначны. Не следует недооценивать значение полевых исследований и по ряду других причин. Результаты отработки экспериментального штабеля существенно дополняют показатели опытов в колоннах информацией по:

- выбору наилучшего типа оросителей (форсунки, разбрызгиватели и т.д.);
- влиянию ряда физических факторов на сооружение штабеля;
- оценке уплотнения штабеля в процессе выщелачивания;
- возможности поддержания выбранной интенсивности орошения штабеля раствором.

Для улучшения технологических показателей процесс часто ведут с пульсирующим орошением — периодически подавая на кучу выщелачивающий раствор с последующим выстаиванием. Раствор при смачивании поверхности куска руды проникает в поры и растворяет минералы. На поверхности куска происходит выделение растворимой соли (например, кристаллов медного купороса) при испарении из него растворителя. При следующем смачивании руды эта соль переходит в раствор и смывается водой. При этом успешно обрабатываются карбонаты, силикаты и вторичные сульфиды меди (халькозин и ковеллин). Первичные же колчеданы не поддаются растворению.

Обязательность пилотных испытаний определяется еще и тем, что некоторые факторы могут быть изучены только в процессе проведения полевых исследований (методы отсыпки, оптимальная высота штабеля, его кольматацию, склонность к разрушению и т.д.).

При подготовке натурного опыта организуются непрерывные наблюдения за ходом опыта и его техническое обеспечение — снабжение реагентами и горючим, наблюдение за работой устройств и агрегатов, обеспечивается оперативная документация. Для аналитического обеспечения опыта непосредственно на полигоне или в пределах его сменной досягаемости организуется полустационарная лаборатория на два рабочих места для анализа рабочих и продуктивных растворов и подземных вод.

Наличие на участке портативного анализатора (рентгено-флуоресцентного спектрометра), основанного на принципе измерения спектра вторичного рентгеновского излучения, позволяет оперативно корректировать ход процесса. Анализатор позволяет идентифицировать химические элементы от натрия (№ 11 в Периодической таблице) до америция (№ 95) в веществах, находящихся в твердом, порошкообразном и жидком состоянии.

Таким образом, действующий полигон опытного геотехнологического опробования оформляется как самостоятельный участок работ с бригадой сотрудников для трехсменной работы.

Оперативная документация опыта заключается в контроле за расходом реагентов в узлах приготовления ВР, а на полигонах КВ контроль за системами орошения и сбора продуктивных растворов. Производится периодическое опробование рабочих и продуктивных растворов для последующего химического анализа. Как правило, в начальный период периодичность опробования и контроля дозирующих устройств составляет до 6 раз в сутки. В период активного выщелачивания частота опробования продуктивного раствора может быть разрежена до одной сборной пробы в сутки.

Технологические растворы (рабочий и продуктивный) анализируются на содержание реагента, активирующих добавок и рН, содержания полезных (основного и попутных) компонентов, а также сумму солей в продуктивном растворе. Дубликаты суточных проб лучше всего сохранять до полного окончания ГРР на данной площади. Целесообразно отобрать несколько больших проб (по 200–300 л) продуктивного раствора разного состава для отработки технологического передела растворов и рекультивации их маточных растворов. Для контроля за загрязнением территории периодическому опробованию подлежат все наземные и подземные воды участка КВ.

Не реже 1 раза в месяц должен проводиться расширенный химический анализ технологических растворов и природных вод. Особое внимание уделяется контролю за изменениями концентраций как полезных, так и «вредных» (токсичных) компонентов. Как показывает опыт взаимодействия геотехнологических предприятий с надзорными органами помимо всего прочего очень полезно фиксировать и отсутствие токсичных элементов, не переходящих в раствор в процессе выщелачивания.

Химический анализ продуктов проводят по аттестованным методикам (ГОСТ 51309-99, ОСТ 41.08-212-04, НСАМ №109-Х), обеспечивающим точность не ниже III категории (максимальное среднеквадратичное отклонение не более  $\pm 30\%$ ).

#### **4.5. Переработка технологических растворов**

Изучение состава технологических растворов и способов их переработки и обезвреживания являются важной составной частью геотехнологических исследований. На этой стадии исследований окончательно решается вопрос о том:

- какие компоненты руд и в каком количестве извлекаются в товарные промпродукты;
- какие выщелоченные компоненты руд загрязняют маточные растворы, намечаются пути их реабилитации;
- какова величина сквозного извлечения полезных компонентов (руда–промпродукт).

Переработка продуктивных растворов КВ ведется методами сорбции, экстракции, электролиза или химического осаждения с выделением товарных концентратов металлов. Часто основная проблема технологической схемы — рентабельное выделение ПК из раствора, разделение выщелоченных веществ и получение товарных концентратов.

Исходя из минерального состава окисленных медных руд, их выщелачивание является преимущественно кислотным, что приводит к формированию технологических растворов очень сложного солевого состава. Это обусловило включение в начало процесса переработки ПР стадии соосаждения гидроксидов молибдена и железа. Затем для проведения исследований по сорбционному извлечению меди из маточных растворов соосаждения выбираются марки сорбентов меди, производство которых

возможно в промышленных масштабах. Это смолы производства концерна LFNXESS, Purolite, The Dow Chemical Company.

Большой объем перерабатываемых продуктивных растворов определяет высокие скорости потока растворов в сорбционных колоннах, достигающие 90–150 м<sup>3</sup>/час на 1 м<sup>2</sup> поперечного сечения колонны. Обычно в цикле сорбционного извлечения ПК из ПР для более полного насыщения сорбента процесс проводят непрерывно в трех колоннах в противоточном режиме. Десорбцию металла с насыщенной смолы проводят в таких же колоннах.

В Приложении 1 в качестве примера приводятся лабораторные работы, выполненные сотрудниками ФГБУ «ВИМС», по подбору сорбентов и переработке ПР выщелачивания окисленных медно-молибденовых руд Сорского месторождения.

## **5. МЕРОПРИЯТИЯ ПО ОХРАНЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

Техника безопасности при проведении геотехнологических работ представляет собой комплекс из правил проведения геологоразведочных работ, правил техники безопасности, принятых для горнодобывающих и химических предприятий.

По классу опасности отходов для окружающей среды (Федеральный классификационный каталог отходов, утвержденный Приказом Федеральной службы по надзору в сфере природопользования от 22 мая 2017 г. № 242 «Отходы (хвосты) обогащения медных руд практически неопасные», код по ФККО 2 22 120 01 39 5; «Отходы (хвосты) флотации молибденово-медных руд», код по ФККО 2 22 123 11 39 5; «Отходы обогащения медных руд и шлака медеплавильного производства в смеси», код по ФККО 2 22 129 11 20 4) отходы предприятий КВ меди могут быть отнесены к IV классу опасности.

Изучение и прогнозирование воздействия процессов разведки и разработки месторождений ТПИ на окружающую природную среду являются обязательной составной частью геологоразведочных работ и проводятся согласно «Временным требованиям к геологическому изучению и прогнозированию воздействия разведки и разработки месторождений полезных ископаемых на окружающую среду» [6]. В результате работ должны быть получены исходные данные для разработки рационального комплекса природоохранных мероприятий и определения их стоимости при технико-экономическом обосновании (ТЭО) временных и постоянных кондиций для подсчета запасов полезных ископаемых.

Влияние разведки и промышленного освоения месторождения, планируемого под отработку геотехнологическими методами, на окружающую среду может выражаться в: нарушении природного ландшафта территории (отвалы, карьеры); изменении режима и состава поверхностных и подземных вод; загрязнении воздушного и водного бассейнов; выводе из



хозяйственного оборота земель; снижении их продуктивности (осушение почв) и других негативных процессах.

Предотвращение или нейтрализация отрицательного воздействия освоения месторождения на природную среду возможно только при наличии максимально полной информации о характере объекта и условиях его эксплуатации, которая должна быть получена в процессе геологоразведочных работ и использована для выработки соответствующих проектных решений и природоохранных мероприятий.

Экологические исследования должны проводиться, начиная с ранних этапов изучения месторождения. Это позволит своевременно выявить вопросы, требующие изучения на последующих стадиях геологоразведочных работ, и учесть ожидаемые экологические и социальные последствия при обосновании целесообразности его промышленного освоения.

В процессе ГРР должны быть:

– оценены возможные экологические последствия разработки месторождения различными способами (подземным, открытым и др.) в условиях нормальной эксплуатации и в аварийных ситуациях. Приоритет следует отдавать способу разработки месторождения и технологической схеме переработки минерального сырья, наносящим минимальный экологический ущерб при рациональной (разумной) полноте использования запасов всех полезных ископаемых и попутных компонентов.

– составлен экологический паспорт месторождения (предприятия, рудника), отражающий настоящее состояние объекта, историю его отработки и прогноз развития экологической ситуации при его отработке.

Получение значительной части требуемых экологических данных невозможно без проведения технологических исследований. Также значительная часть требуемых данных не может быть правильно оценена без учета особенностей применяемой технологии переработки руд.

*Организационные мероприятия* ООС предполагают: разработку системы контроля за растеканием технологических растворов за пределы рабочей зоны, создание санитарно-защитных зон предприятий КВ в виде сети стационарных наблюдательных пунктов (скважин или гидропостов).

*Ликвидационные мероприятия* ООС предполагают: нейтрализацию растворов, их очистку, рекультивацию поверхности и отвалов КВ.

## **6. ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПЕРЕРАБОТКИ ОКИСЛЕННЫХ МЕДНЫХ РУД КОМПЛЕКСНОГО СОСТАВА**

### **6.1. Критерии оценки**

Критерии оценки могут быть разработаны по аналогии на основании многолетнего промышленного опыта эксплуатации методом КВ месторождений меди, золота, урана и др. Основными критериями оценки рудного сырья являются (СТО РосГео 09-001-98 Твердые полезные ископаемые и горные породы. Технологическое опробование в процессе геологоразведочных работ. Общие требования. М.: РосГео, 1998):

– содержание ПК в исходном сырье —  $C_{ПК}$  и товарной продукции —  $C_{ТП}$  (при выходе ее от массы исходного материала  $\gamma$ );

– извлечение ПК в концентрат —  $\acute{\epsilon}_t$ , определяемое как соотношение количества его в товарной продукции и исходном сырье,  $\acute{\epsilon}_m = \gamma \times C_{ТК} / C_{ПК}$ . Это «товарное» извлечение, так как учитывает только извлеченную в товарную продукцию долю ПК. Обычно ею пользуются для оценки попутных компонентов;

– извлекаемая продуктивность руды —  $M$ , определяемая как количество ПК, извлекаемого из 1 тонны исходного материала в товарную продукцию,  $M = C_{ПК} \times \acute{\epsilon}_m / 10$  (1) или  $M = \gamma \times C_{ПК} / 10$  (2) в килограммах ПК из 1 тонны сырья при размерностях  $C_{ТК}$ ,  $\acute{\epsilon}$ ,  $\gamma$ ,  $C_{ПК}$  в процентах, второй вариант формулы определения  $M$  используется для оценки попутных компонентов — обычно III-ей группы, точно определить содержание которых в исходном сырье затруднительно или невозможно.

Критерии оценки месторождений могут быть разделены по степени благоприятности для рентабельной добычи того или иного металла на весьма благоприятные, благоприятные и неблагоприятные. Критерии определяются рядом факторов, имеющих определенное влияние как на саму возможность осуществления метода КВ, так и на экономические, экологические и технологические аспекты его применения. По уровню влияния все факторы могут быть обозначены как решающие, определяющие и второстепенные.

Решающие факторы определяют принципиальную возможность применения метода КВ. Определяющие факторы существенно влияют на экономику, технику, экологию и технологию процесса, а второстепенные факторы имеют подчиненное значение при решении экономических, экологических и технологических задач. В связи с определенной условностью приведенных критериев и уровней влияния на них различных факторов, в каждом конкретном случае необходимо все критерии рассматривать только в комплексе, с учетом всех аспектов применения метода КВ. Это позволяет на различных стадиях ГРП более достоверно определять кондиции для руд различных металлов применительно к отработке их методами КВ.

Важно установить основные параметры оруденения, необходимые для оценки пригодности конкретного месторождения к отработке способом КВ. Определение параметров оруденения осуществляется, в основном, хорошо известными методами: геологическими и гидрогеологическими, технологическими и физико-химическими.

Качественная оценка природных факторов базируется на данных о геологических особенностях месторождения. При этом сами геологические показатели могут иметь количественное выражение (мощность и проницаемость руд, содержание в них полезного компонента и т.п.), но оценка влияния на результаты отработки останется качественной (весьма благоприятные, благоприятные и неблагоприятные условия), так как не дает возможности количественно прогнозировать ход и результаты работы штабелей КВ.

Количественная характеристика природных факторов базируется на геотехнологических показателях, позволяющих (в сочетании с геологическими показателями) количественно прогнозировать ход и результаты эксплуатации рассматриваемого месторождения конкретным геотехнологическим способом. Геотехнологическая оценка результатов опытных работ заключается в установлении принципиальной пригодности данного конкретного рудного тела, участка, отвала бедных руд или хвостохранилища для отработки способом КВ.

Такая оценка достигается сравнением опытных величин геотехнологических показателей  $S_{ПКср}$ ,  $\epsilon$ ,  $Z$  с нормированными величинами этих показателей. Для сравнения используются отраслевые нормативы. При отсутствии строго обоснованных отраслевых нормативов для сравнения используются значения соответствующих показателей, достигаемые на действующих предприятиях отрасли. Когда отсутствуют действующие предприятия, следует ориентироваться на технологический минимум передела продуктивных растворов. При отсутствии и этих величин следует использовать литературные данные.

Обоснование нормированных показателей как разрешающих признаков рассматривается на примере традиционного геотехнологического ПК — урана. Разрешающие признаки при опытном сернокислотном опробовании: средняя концентрация урана в ПР —  $S_{Уср} \geq 20$  мг/л; извлечение в ПР —  $\epsilon \geq 60$  %; удельный расход кислоты  $Z \leq 300$  кг кислоты/кг урана.

Подобные величины следует подобрать для меди (молибдена и др. металлов) и рассматривать как временные нормативы. В зависимости от конъюнктуры они уточняются. Приняв их за основу, можно осуществлять оценку результатов опытного геотехнологического опробования. Если хотя бы один из трех показателей не соответствует норме, штабель получает отрицательную оценку. При соответствии норме по всем трем показателям результат опыта оценивается как положительный. Такая оценка делается по завершённому опыту, т.е. в том случае, когда в продуктивном растворе после достижения максимума произошло уменьшение содержания полезного компонента до 20–10 мг/л.

При оценке незавершённых опытов допустимы отступления. Оценка результатов незавершённого опыта допускает ограниченную временную экстраполяцию на основе установленных закономерностей изменения геотехнологических показателей во времени. Незавершённым считается опыт, не достигший установленного минимума содержания полезного компонента, подлежащего реализации. Однако прохождение максимума концентрации является обязательным во всех случаях.

Оценка результата опыта по попутному компоненту делается по среднему содержанию, которое должно превышать установленный минимум для каждого попутного компонента. Степень извлечения оценивается по достигнутому уровню, удельные затраты растворителя относятся к основному полезному компоненту. Достоинство участка повышается за счет

факта содержания в растворе попутного компонента с учетом  $C_{ПКср} > C_{ПКпр}$  и достигнутого. Более обоснованных норм на попутные компоненты пока нет.

Назначение геотехнологических прогнозных расчетов — получение исходных показателей стоимостной модели предприятия для месторождения. На этой основе определяются капитальные и эксплуатационные затраты, себестоимость единицы продукции, решается вопрос об экономической целесообразности отработки месторождения тем или иным способом или их комбинаций [7].

Прогнозные геотехнологические расчеты основных эксплуатационных характеристик выполняются по исходным данным, полученным при реализации всего комплекса геологоразведочных работ. Единого перечня исходных данных не существует. Имеются отдельные отраслевые документы.

## **6.2. Расчет основных показателей эффективности**

Технико-экономическая оценка производится с использованием следующих методических указаний и рекомендаций [7, 8, 9]:

*1. Методические рекомендации по технико-экономическому обоснованию кондиций для подсчета запасов месторождений твердых полезных ископаемых (кроме углей и горючих сланцев). Утверждены распоряжением МПР России от 05.06.2007 г. № 37-р.*

*2. Методические рекомендации по расчету экономической эффективности инвестиционных проектов. Утверждено Министерством экономики РФ, Министерством финансов РФ, Государственным комитетом РФ по строительной, архитектурной и жилищной политике 21.06.1999 N ВК477*

*3. Классификация основных средств, включаемых в амортизационные группы. Постановление Правительства РФ от 01.01.2002 № 1 (ред. от 28.04.2018).*

Для технико-экономической оценки необходимы три группы эксплуатационных характеристик:

- характеристики месторождений (залежи, блока);
- характеристики технологического передела;
- характеристики добычного штабеля.

Для экономической оценки целесообразности отработки месторождения, кроме учета цен на возможные для получения товарные продукты, необходимо посчитать их себестоимость и сравнить возможные варианты. Кроме того, уточнить спрос на них и их предложение на внутреннем и мировом рынках.

В качестве примера в Приложении 2 к данным «Методическим рекомендациям...» приведены исходные данные, выданные сотрудниками ФГБУ «ВИМС», для определения экономической эффективности разработанной технологической схемы переработки медно-молибденовых руд методом КВ для окисленных руд Сорского месторождения (рисунок 1).

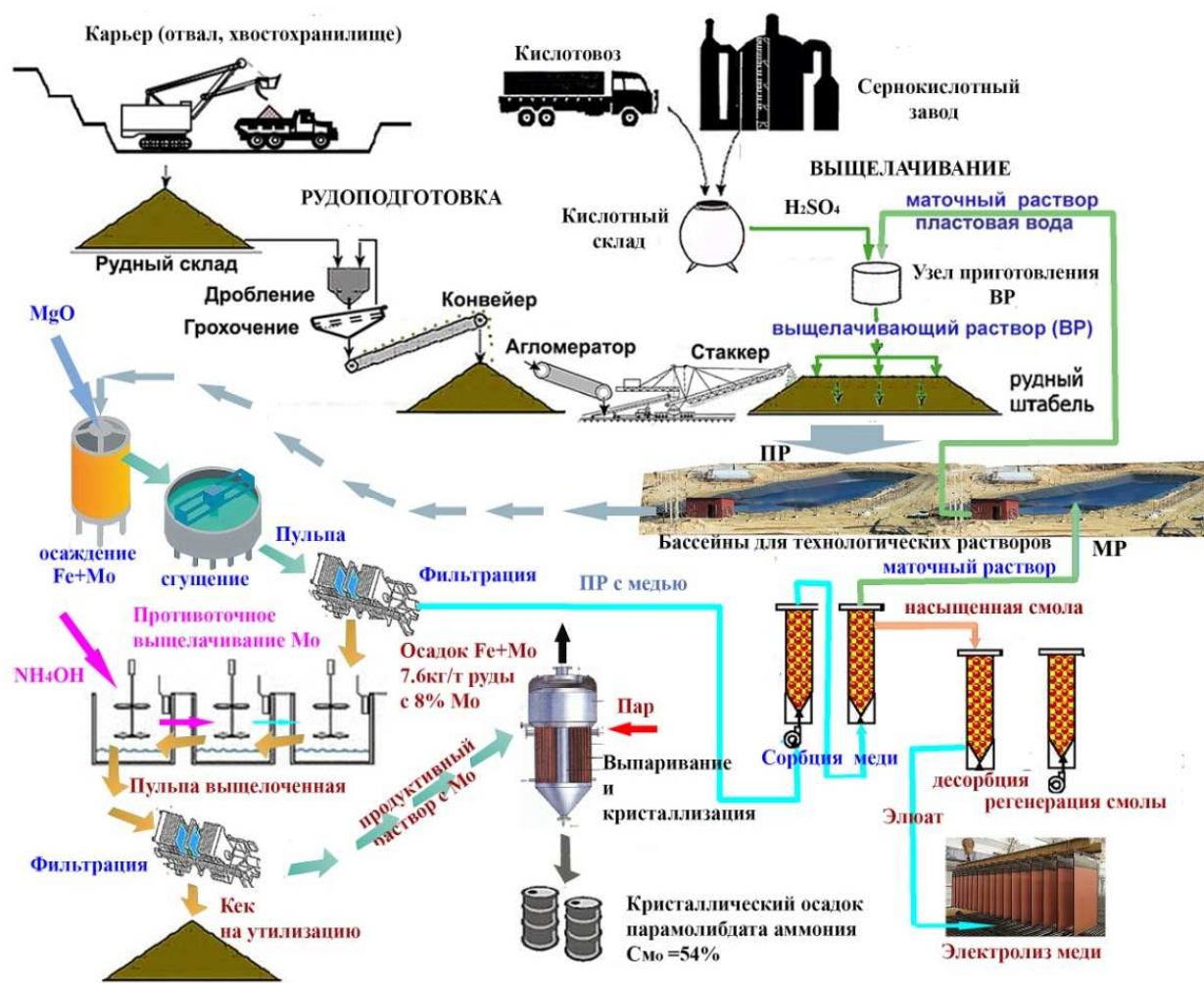


Рисунок 1. Принципиальная технологическая схема сернокислотного выщелачивания окисленных медно-молибденовых руд методом КВ

В расчетах используются такие понятия, как:

- ставка (норма) дисконтирования;
- ДП — денежный поток или Cash Flow (CF);
- ЧДД — чистый дисконтированный доход или чистая современная стоимость, Net Present Value (NPV);
- ИД — индекс доходности или Profitability Index (PI);
- ВНД — внутренняя норма доходности или внутренняя норма прибыли, Internal Rate of Return (IRR).

Денежный поток — это движение наличных средств, будущих денежных поступлений (приток) и расходов (отток) при строительстве и эксплуатации предприятия, иллюстрирующее финансовые результаты от возможной реализации проекта.

При расчете денежного потока приведение разновременных затрат и доходов к начальному периоду оценки осуществляется с использованием процедуры дисконтирования.

Коэффициент дисконтирования ( $q_t$ ) определяется по формуле:

$$q_t = \frac{1}{(1+E)^t}$$

где:  $E$  — ставка дисконтирования, доли ед.;

$t$  — номер расчетного года.

В соответствии с п. 45 «Методических рекомендаций по технико-экономическому обоснованию кондиций...» при отсутствии документального обоснования ставки дисконтирования обычно принимаются равными 10 и 15 %.

Чистый дисконтированный доход для постоянной нормы дисконтирования вычисляется как сумма, приведенных к начальному этапу оценки, всех доходов за весь расчетный период. Величина ЧДД рассчитывается по формуле:

$$\text{ЧДД (NPV)} = \sum_{t=0}^T (\text{Ц}_t - \text{З}_\text{п} + \text{А}_t) \frac{1}{(1+E)^t} - \sum_{t=0}^T \left( \text{К}_t \frac{1}{(1+E)^t} \right),$$

где:  $\text{Ц}_t$  — стоимость реализованной продукции (выручка предприятия) в  $t$ -м году;

$\text{З}_\text{п} = \text{З}_t + \text{Н}_\text{ф} + \text{Н}_\text{п}$  — полные затраты, производимые в  $t$ -м году;

$\text{А}_t$  — амортизационные отчисления, производимые в  $t$ -м году;

$T$  — расчетный период (в общем случае от начала строительства до ликвидации предприятия);

$\text{К}_t$  — капитальные вложения в  $t$ -м году;

$\text{Н}_\text{п}$  — налог на прибыль;

$\text{Н}_\text{ф}$  — налоги, погашаемые из валовой прибыли (налог на имущество).

Если величина чистого дисконтированного дохода положительная, проект признается экономически эффективным.

Индекс доходности представляет собой отношение суммы приведенных доходов ( $\text{Ц}_t - \text{З}_\text{п} + \text{А}_t$ ) к величине приведенных капиталовложений:

$$\text{ИД} = \frac{\sum_{t=0}^T (\text{Ц}_t - \text{З}_\text{п} + \text{А}_t) \frac{1}{(1+E)^t}}{\sum_{t=0}^T \text{К}_t \frac{1}{(1+E)^t}}$$

В экономически эффективных проектах величина ИД больше единицы.

Внутренняя норма доходности представляет собой ту норму дисконтирования, при которой величина приведенных доходов равна приведенным капиталовложениям. В случае, если ВНД больше величины нормы дисконтирования, инвестиционный проект имеет достаточный запас прочности при его реализации.

Срок окупаемости капиталовложений — минимальный период времени от начала реализации проекта, за пределами которого величина накопленного (кумулятивного) денежного потока становится положительной. При оценке проекта используется два срока окупаемости — с использованием процедуры дисконтирования и без нее.

### **6.2.1. Выбор геотехнологического объекта–аналога**

Осуществляется по ряду критериев основными из которых, влияющими на уровень капитальных вложений и эксплуатационных затрат, являются:

- экономическая освоенность района расположения объекта;
- место нахождения объекта;
- способ разработки объекта;
- технология разработки объекта;
- технология обогащения получения товарных продуктов;
- количество и качество получаемых основных и попутных товарных продуктов;
- размер объекта по количеству запасов и ресурсов;
- годовая производственная мощность перерабатывающего комплекса по руде и горной массе.

### **6.2.2. Методология расчета инвестиционных и эксплуатационных затрат**

#### Расчет капитальных и эксплуатационных затрат

Базой для расчета первоначальных капитальных и эксплуатационных затрат является исходная информация, полученная в результате технологических исследований проб по оцениваемому объекту. Такой информацией является:

- технологическая схема переработки руд с описанием технологических процессов;
- наименование выпускаемых товарных продуктов с указанием ГОСТа, ОСТА, ТУ;
- технологические показатели: выход концентратов и продуктов, технологическое извлечение по переделам и сквозное, содержание полезных и вредных компонентов в товарных продуктах;
- возможная годовая мощность по руде;
- потери и разубоживание руды;
- режим работы рудо-перерабатывающего комплекса;
- характеристика производственных отходов;
- перечень технологического оборудования, необходимого для организации производства с указанием технических характеристик на указанную производственную мощность;
- нормы обслуживания технологического оборудования и явочное количество работников, задействованных в производственном процессе с указанием квалификации и типа выполняемых работ для выполнения годовой производственной мощности;
- расход основных материалов и реагентов с разбивкой по переделам;
- расход энергетических ресурсов с разбивкой по переделам (электроэнергии, технологической воды, тепла, газа, пара и пр.).

Исходя из конъюнктуры рынка товарных продуктов, а также данных по запасам руды и содержанию полезных компонентов в товарных продуктах и

их качеству, уточняется годовая производственная мощность перерабатывающего комплекса. Расчетный период принимается 20 лет или на срок отработки запасов, если он менее 20 лет. Оценивается возможность использования прогнозных ресурсов.

Прямым счетом рассчитываются объемы инвестиций в основное производственное оборудование. Статьи инвестиционных затрат, которые на текущем этапе укрупненной оценки не могут быть определены прямым счетом, рассчитываются по укрупненным показателям на основании объектов-аналогов с учетом намечаемой производительности по добыче и переработке с применением поправочных коэффициентов-дефляторов на дату проведения оценки и в пересчете на изменение производственной мощности оцениваемого объекта в сравнении с выбранным объектом-аналогом.

#### Расчет эксплуатационных затрат

Амортизация рассчитывается линейным способом на основе норм амортизационных отчислений, установленных в РФ.

Расчет основных затрат на материалы и реагенты, заработную плату, топливо, электроэнергию и воду, налоговые отчисления осуществляется прямым счетом. На основании объектов-аналогов производится укрупненная оценка ряда прочих статей затрат: стоимость руды (включает добычу руды, горно-капитальные работы, вскрышу), транспортно-заготовительные работы, общепроизводственные, общехозяйственные и коммерческие расходы.

Расчет фонда оплаты труда персонала выполняется на основе данных Росстата о среднемесячной заработной плате по субъектам Российской Федерации и о среднемесячной заработной плате по видам экономической деятельности за период 12 месяцев на дату оценки.

#### Налоговые отчисления и плата за выбросы загрязняющих веществ

Налоговые отчисления по налогу на прибыль рассчитываются в соответствии с Гл. 25 части 2 НК РФ.

Ставки страховых взносов рассчитываются в соответствии с Гл. 34 НК РФ.

Страховые тарифы на обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний принимаются согласно закону от 22.12.2005 № 179-ФЗ.

Расчет налога на имущество производится в соответствии с Гл. 30 НК РФ (в ред. 202-ФЗ от 29.11.2012). Ставка налога составляет 2,2 % от остаточной стоимости основных фондов предприятия.

Размер отчислений по налогу на добычу полезных ископаемых определяется согласно Статье 342 НК РФ.

Плата за выбросы загрязняющих веществ и размещение отходов производства оценивается в размере 0,5–1 % от затрат на добычу и переработку руды.

Прочие налоги и платежи оцениваются в размере 1–2 % от стоимости товарной продукции.



На основании выполненных расчетов производится оценка экономической эффективности оцениваемого объекта с получением показателей, указанных в п. 6.1.

В качестве примера в Приложении 3 к данным «Методическим рекомендациям...» приведен расчет экономической эффективности переработки медно-молибденовых руд методом КВ по разработанной сотрудниками ФГБУ «ВИМС» технологической схеме на примере окисленных руд Сорского месторождения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Практически каждое крупное скопление медных руд комплексного состава, за исключением объектов ПВ, можно рассматривать в качестве объекта применения способа кучного выщелачивания. Однако круг рассмотрения ограничивается металлами, перспективными для добычи способом КВ. Перспективность конкретного металла определяется путём анализа технологических, геолого-гидрогеологических и организационно-технических предпосылок использования геотехнологических методов.

При наличии перспектив дальнейшее рассмотрение придерживается двух направлений применения способа КВ:

1. Полная отработка месторождений, содержащих руды экономически не пригодные для традиционного заводского передела.

2. Комплексная отработка месторождений, включающая заводскую переработку обогатимых и богатых руд, и доработку бедных и забалансовых руд способом КВ до достижения предела рентабельности.

Пригодность месторождений для отработки указанным способом устанавливается выполнением геотехнологических исследований, реализуемых в соответствии с приведённой стадийностью и возможными способами кучного выщелачивания.

По результатам опытного геотехнологического опробования определяют расчётные геотехнологические параметры процесса КВ. Получаемые основные геотехнологические показатели позволяют выполнить прогнозные расчёты эксплуатационных показателей как элементов стоимостной модели. Определяемые в результате прогнозных расчётов элементы стоимостной модели эксплуатации, в свою очередь, являются основой технико-экономической оценки эксплуатационных систем.

Технологические аспекты эксплуатации и уточнение эксплуатационных показателей — это предметы опытно-промышленных испытаний, реализуемых на стадии технико-экономических исследований при освоении разведанных месторождений. Опытно-промышленные испытания выполняются с переделом продуктивных растворов.

К доработке месторождений приступают, когда переработка заводским способом приближается к пределу рентабельности. Возможна параллельная и завершающая доработка. Параллельная доработка, предполагающая комбинированное использование заводского и различных способов кучного выщелачивания, получила название *горно-химической технологии*. Завершающая доработка — это полный перевод добычи на способы кучного выщелачивания при наличии сырьевых материалов. Примером параллельной доработки является производство урана из руд скальных месторождений Стрельцовского рудного поля (Россия).

Примером и параллельной, и завершающей доработки может служить комбинат Königstein (Германия), где в первом случае уран добывали комбинированными системами, а затем был осуществлён переход на добычу только способами кучного выщелачивания. Таким образом, объектами

геотехнологических исследований применительно к комбинированным системам являются месторождения, изначально рентабельные для разработки горным способом и уже частично или полностью отработанные.

Объектами доработки месторождений, являются склады забалансовых руд, хвосты обогащения, отвалы и некондиционные руды в естественном залегании, балансовые руды, оставленные в целиках. Переработка указанных сырьевых материалов осуществляется способами кучного, блочного и отвального выщелачивания.

Доказательство пригодности извлечённых сырьевых материалов и руд для переработки этими способами достигается также постановкой натуральных испытаний на следующих объектах: экспериментальном (опытном) блоке шахтного выщелачивания, экспериментальном штабеле кучного выщелачивания и экспериментальном участке отвального выщелачивания.

Натурные испытания по выщелачиванию названными способами могут быть выполнены как в опытном, так и в опытно-промышленном масштабе. Использование различных способов рудоподготовки (грануляция, дробление) позволяет вовлекать в процесс изначально непригодный или недостаточно подготовленный для выщелачивания материал. После рудоподготовки эффективность выщелачивания может существенно повышаться.

Целью опытного опробования на указанных объектах геотехнологических исследований является получение основных показателей процесса ( $C_{cp}$ ,  $z$ ,  $e$ , Ж:Т), которые используются затем для выполнения прогнозных расчётов основных эксплуатационных показателей.

К основным направлениям развития геотехнологических методов получения меди и сопутствующих металлов из руд комплексного состава в настоящее время относятся:

- оптимизация процесса сернокислотного КВ (снижение удельного расхода реагентов, минимизация водопотребления, снижение количества меди в незавершенном производстве, испытание различных режимов аэрации, внедрение систем автоматизированного контроля за процессом);
- поиск потенциально новых видов сырья для переработки методом КВ;
- исследование путей повышения эффективности процесса кучного биовыщелачивания (бактериального КВ);
- разработка технологий ферментного (безбактериального) кучного биовыщелачивания;
- разработка и испытание новых типов сорбентов, экстрагентов и методов переработки продуктивных растворов;
- разработка и испытание новых типов геомембран, геокомпозитов и вспомогательных материалов для КВ;
- работы по поиску и испытанию новых реагентов и добавок для ускорения процесса КВ меди (соляная кислота и хлорид-ионы);
- разработка новых методов рекультивации отвалов и технологических растворов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Медные руды. Утверждены распоряжением МПР России от 05.06.2007 г. № 37-р.
2. Салтыков А.С. Влияние вещественного состава руд гидрогенных месторождений на процесс подземного выщелачивания урана / в Сб. докладов «Актуальные проблемы урановой промышленности: III международная научно-практическая конференция», Алматы, 2004. С. 83–93.
3. Кучное выщелачивание благородных металлов. Под ред. М.И. Фазлуллина, М.: Академия горных наук, 2001. 647 с.
4. Авдонин Г.И., Кольцов В.Ю., Кузнецов И.В., Калашников А.В., Салтыков А.С., Сютин В.П. Оценка возможности отработки глинистых редкоземельно-фосфатных руд способом кучного выщелачивания / Вестник РАЕН, № 6, т. 13 М.: 2013. С. 115–123.
5. Авдонин Г.И., Гуров В.А., Грязнов В.М., Салтыков А.С., Сютин В.П. Лабораторные работы и натурные испытания по кучному выщелачиванию уран-редкоземельно-фосфатных руд Шаргадыкского месторождения (Калмыкия) / Труды научно-практической конференции с международным участием «Геотехнологические методы освоения месторождений твердых полезных ископаемых». М.: ФГУП «ВИМС», 2016. С. 130–133.
6. Временные требования к геологическому изучению и прогнозированию воздействия разведки и разработки месторождений полезных ископаемых на окружающую среду. М.: ГКЗ при СМ СССР, 1990.
7. Методические рекомендации по технико-экономическому обоснованию кондиций для подсчета запасов месторождений твердых полезных ископаемых (кроме углей и горючих сланцев). Утверждены распоряжением МПР России от 05.06.2007 г. № 37-р.
8. Методические рекомендации по расчету экономической эффективности инвестиционных проектов. Утверждено Министерством экономики РФ, Министерством финансов РФ, Государственным комитетом РФ по строительной, архитектурной и жилищной политике 21.06.1999 N ВК477.
9. Классификация основных средств, включаемых в амортизационные группы. Постановление Правительства РФ от 01.01.2002 № 1 (ред. от 28.04.2018).

### Обоснование рациональной технологической схемы КВ окисленного комплексного медного сырья на примере лабораторного выщелачивания медно-молибденовых руд Сорского месторождения

В качестве эталонных комплексных руд меди для кучного выщелачивания исследовались медно-молибденовые руды Сорского и медьсодержащие молибденовые руды Агаскырского месторождений, отобранные из отвалов бедных и окисленных руд (рисунок 1). После тестирования частных проб были сформированы технологические пробы: рядовая и бедная медно-молибденовые сульфидные (из рудного материала Сорского месторождения) и рядовые и бедные медно-молибденовые окисленные (из окисленного рудного материала Агаскырского и Сорского месторождений).

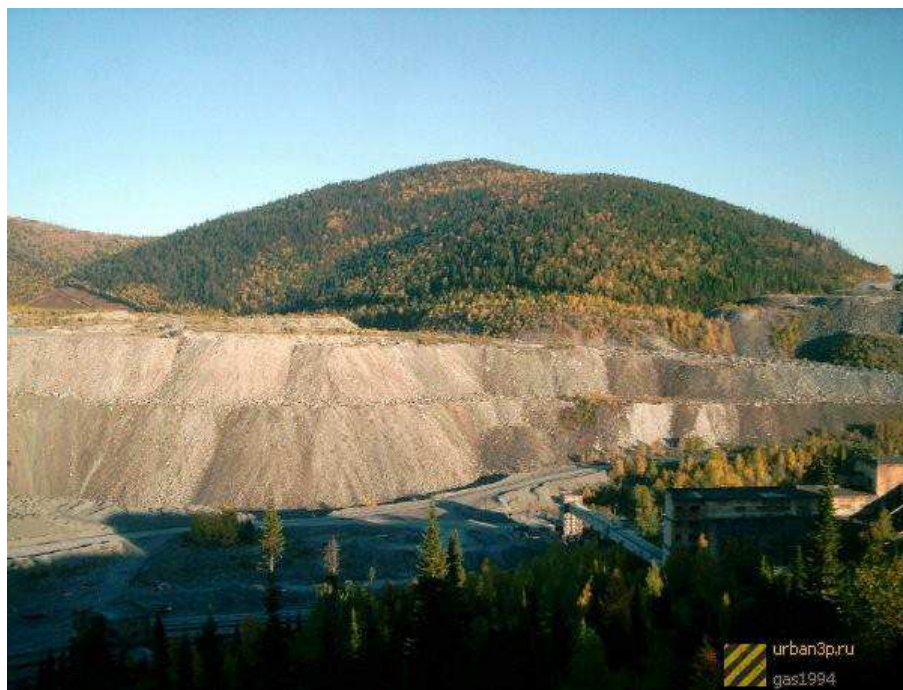


Рисунок 1. Отвалы ГОКа на Сорском месторождении медно-молибденовых руд

В ходе работ были проведены исследования следующих технологических решений:

- сернокислотное КВ меди из комплексных руд;
- выщелачивание с окомкованием рудной мелочи;
- применение пероксида водорода ( $H_2O_2$ ) в качестве окислителя при сернокислотном выщелачивании молибдена из сульфидных минералов;
- гипохлоритное выщелачивание молибдена и меди из комплексных руд с использованием метода аммиачного выщелачивания нескольких элементов из руд при обычных температуре и давлении;
- использование добавок хлорида меди и гипохлорит-ионов для разрушения кристаллической структуры халькопирита перед выщелачиванием.

Для выбора растворителя опыты проводились на измельченном материале проб крупностью  $-0,074$  мм (навеска — 50 г, Ж/Т=100, время опыта — 2 часа,  $t$  —  $20^{\circ}\text{C}$ , атмосферное давление) при перемешивании в стеклянных стаканах на магнитных мешалках. В качестве растворителя использовались растворы гипохлорита натрия ( $\text{NaClO}$ ) и серной кислоты различных концентраций как с окислителями  $\text{Fe}^{3+}$  и  $\text{H}_2\text{O}_2$ , так и без окислителя (таблица 1).

Таблица 1

Результаты агитационных опытов по выбору растворителя

| Тип рудного материала           | Кислота исходная, г/л | Окислитель                   | Концентрация, г/л |       |       |                  |                  |
|---------------------------------|-----------------------|------------------------------|-------------------|-------|-------|------------------|------------------|
|                                 |                       |                              | Сu                | Мо    | Кисл. | $\text{Fe}^{3+}$ | $\text{Fe}^{2+}$ |
| Молибденитовый                  | 12                    | нет                          | 0,012             | 0     | 10,29 | 0,13             | 0,02             |
|                                 | 100                   | нет                          | 0                 | 0     | 84,3  |                  |                  |
|                                 | 12                    | $\text{Fe}^{3+}$ 1 г/л       | 0                 | 0     | 10,71 | 0,98             | 0,14             |
|                                 | 12                    | $\text{Fe}^{3+}$ 3 г/л       | 0                 | 0     | 10,87 | 3,37             | 0,05             |
|                                 | 12                    | $\text{Fe}^{3+}$ 5 г/л       | 0                 | 0     | 10,87 | 3,37             | 0,05             |
|                                 |                       | $\text{NaClO}$ 10 г/л        | 0                 | 0     |       |                  |                  |
| Медно-молибденитовый сульфидный | 12                    | нет                          | 0                 | 0     | 10,78 | 0,16             | 0,1              |
|                                 | 100                   | $\text{H}_2\text{O}_2$ 1 г/л | 0                 | 0     | 10,74 | 1,2              | 0,098            |
|                                 | 12                    | $\text{Fe}^{3+}$ 1 г/л       | 0                 | 0     | 10,74 | 1,2              | 0,098            |
|                                 | 12                    | $\text{Fe}^{3+}$ 3 г/л       | 0                 | 0     | 10,68 | 3,2              | 0,22             |
|                                 |                       | $\text{NaClO}$ 20 г/л        | 0                 | 0,286 |       |                  |                  |
|                                 |                       | $\text{NaClO}$ 10 г/л        |                   | 0,249 |       |                  |                  |
|                                 | $\text{NaClO}$ 5 г/л  |                              | 0,212             |       |       |                  |                  |
| Медно-молибденитовый окисленный | 12                    | нет                          | 1,95              | 0,032 | 6,86  | 0,44             | 0,1              |
|                                 | 12                    | $\text{Fe}^{3+}$ 1 г/л       | 2,4               | 0,018 | 7,33  | 0,56             | 1,06             |
|                                 | 12                    | $\text{Fe}^{3+}$ 3 г/л       | 2,3               | 0,019 | 7,94  | 3,06             | 1,81             |

Как следует из полученных данных, окисленные медно-молибденитовые руды при нормальных условиях легко вскрываются растворами серной кислоты, которые могут использоваться при кучном выщелачивании для совместного извлечения Сu и Мо. Молибденитовые и сульфидные медно-молибденитовые руды при нормальных условиях вскрываются только растворами гипохлорита.

Для оценки технологических показателей извлечения меди и молибдена из бедных и окисленных руд Сорского месторождения (извлечения ПК в раствор) была проведена серия сравнительных агитационных опытов. Опыты проводились на истертом до крупности  $-0,074+0$  мм исходном рудном материале и отсеве  $-5+0$  мм, масса навесок 50–100 г при изменении параметров — время и концентрация кислоты (таблица 2).

Результаты агитационных опытов

| Руда                    | Условия опыта<br>H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ;<br>Ж/Т; время, ч | Концентрация<br>в ПР, мг/л |       | Содержание<br>в кеке, % |       | Исходное<br>содержание,<br>% |       | Извлечение,<br>% |      |
|-------------------------|--------------------------------------------------------------------|----------------------------|-------|-------------------------|-------|------------------------------|-------|------------------|------|
|                         |                                                                    | Сu                         | Мо    | Сu                      | Мо    | Сu                           | Мо    | Сu               | Мо   |
| окисленная<br>–0,074 мм | 20 г/л,<br>Ж/Т – 10, 4 ч                                           | 13                         | 34,0  | 0,038                   | 0,019 | 0,051                        | 0,053 | 25,0             | 64,0 |
| окисленная<br>–0,074 мм | 20 г/л,<br>Ж/Т – 10, 2 ч                                           | 13                         | 21,0  | 0,034                   | 0,030 | 0,047                        | 0,051 | 27,0             | 41,0 |
| окисленная<br>–5 мм     | 20 г/л,<br>Ж/Т – 5, 2 ч                                            | 60                         | 21,0  | 0,05                    | 0,05  | 0,08                         | 0,061 | 37,5             | 17,0 |
| окисленная<br>–5 мм     | 10 г/л,<br>Ж/Т – 5, 2 ч                                            | 11                         | 42,3  | 0,03                    | 0,11  | 0,048                        | 0,153 | 23,0             | 16,0 |
| бедная<br>–0,074 мм     | 20 г/л,<br>Ж/Т – 10, 4 ч                                           | 48                         | 0,0   | 0,066                   | 0,098 | 0,114                        | 0,098 | 42,0             | 0,0  |
| бедная<br>–0,074 мм     | 20 г/л,<br>Ж/Т – 10, 2 ч                                           | 64                         | 0,0   | 0,10                    | 0,16  | 0,164                        | 0,16  | 39,0             | 0,0  |
| бедная<br>–5 мм         | 20 г/л,<br>Ж/Т – 5, 4 ч                                            | 207                        | 26,0  | 0,04                    | 0,08  | 0,233                        | 0,153 | 44,0             | 8,9  |
| бедная<br>–5 мм         | 10 г/л,<br>Ж/Т – 5, 2 ч                                            | 83                         | 18,0  | 0,129                   | 0,134 | 0,171                        | 0,143 | 24,3             | 6,3  |
| бедная<br>–0,074 мм     | NaClO 2,5 г/л,<br>Ж/Т – 10, 2 ч                                    | 5                          | 110,0 | 0,06                    | 0,02  | 0,065                        | 0,12  | 7,7              | 91,7 |
| окисленная<br>–0,074 мм | NaClO 2,5 г/л,<br>Ж/Т – 10, 2 ч                                    | 5                          | 27,0  | 0,06                    | 0,04  | 0,065                        | 0,067 | 7,7              | 40,3 |

Результаты показали, что показатель извлечения молибдена сернокислыми растворами полностью зависит от степени окисления руды, и очень слабо — от концентрации кислоты. Из окисленной руды достигается удовлетворительное извлечение Мо. Показатель извлечения меди сильно зависит от степени окисления материала и концентрации кислоты. При КВ увеличение времени контакта приводит к росту извлечения меди до 30–40 %, а молибдена — более 60 %, что приемлемо для медно-молибденовых руд.

Опыты по инфльтрационному выщелачиванию подтвердили то, что лучшие показатели по извлечению в раствор получены при сернокислотном выщелачивании Сu и Мо из отвалов окисленных руд Сорского месторождения.

На завершающем этапе проводились исследования по переработке ПР выщелачивания. Было установлено, что сорбционное извлечение молибдена из кислых сред с применением современных анионитов проходит малоэффективно. Для сорбции использовались отечественные сорбенты и иониты компаний Lanxess и Purolite (таблица 3).

## Результаты сорбции молибдена

| № п/п | Марка сорбента          | Тип матрицы      | Структура                                            | Функциональная группа       | Обменная емкость по Мо, г/л | Коэфф. концентрирования |
|-------|-------------------------|------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| 1     | АМП                     | Полистирол + ДВБ | Макропористый сильноосновной анионит                 | Четвертичный амин           | 3                           | 7                       |
| 2     | Lewatit A 365           | полиакрил        | Макропористый слабоосновной анионит                  | Полиамин                    | 5                           | 12                      |
| 3     | Lewatit Monoplus MP 800 | Полистирол + ДВБ | Макропористый сильноосновной анионит                 | Четвертичный амин           | 12                          | 29                      |
| 4     | Lewatit MP 62 WS        | Полистирол + ДВБ | Макропористый слабоосновной анионит                  | Третичный амин              | 2                           | 5                       |
| 5     | Lewatit TP 207 Monoplus | Полистирол + ДВБ | Макропористый слабокислотный катионит хелатного типа | Имино-диацетат              | 6                           | 15                      |
| 6     | Puromet™ MTA1002        | Полистирол + ДВБ | Макропористый анионит со смешанной основностью       | Четвертичный амин           | 3                           | 7                       |
| 7     | Puromet® MTA5081        | Полистирол + ДВБ | Макропористый сильноосновной анионит                 | Четвертичный амин           | 3                           | 7                       |
| 8     | Puromet® MTA6002PF      | Полистирол + ДВБ | Гелевый сильноосновной анионит                       | Четвертичный амин           | 7                           | 17                      |
| 9     | Puromet® S959           | Полиакрил + ДВБ  | Макропористый слабоосновной анионит                  | Амин с хелатными свойствами | 2                           | 5                       |

Лучшие результаты были достигнуты при соосаждении молибдена с железом. При нейтрализации ПР раствором едкого натра было достигнуто извлечение молибдена из раствора 97 % при значении рН 4,1.

В итоге проведенных работ была разработана оптимальная технология КВ для переработки комплексных окисленных медно-молибденовых руд, включающая следующие операции (рисунок 2):

- дробление, грануляцию с серной кислотой и укладку руды в штабель;
- кучное сернокислотное выщелачивание;
- нейтрализацию магниезией продуктивных растворов КВ до значений рН = 4 с осаждением Fe и до 97 % Мо;
- отделение раствора с направлением осветленного раствора на сорбцию меди;



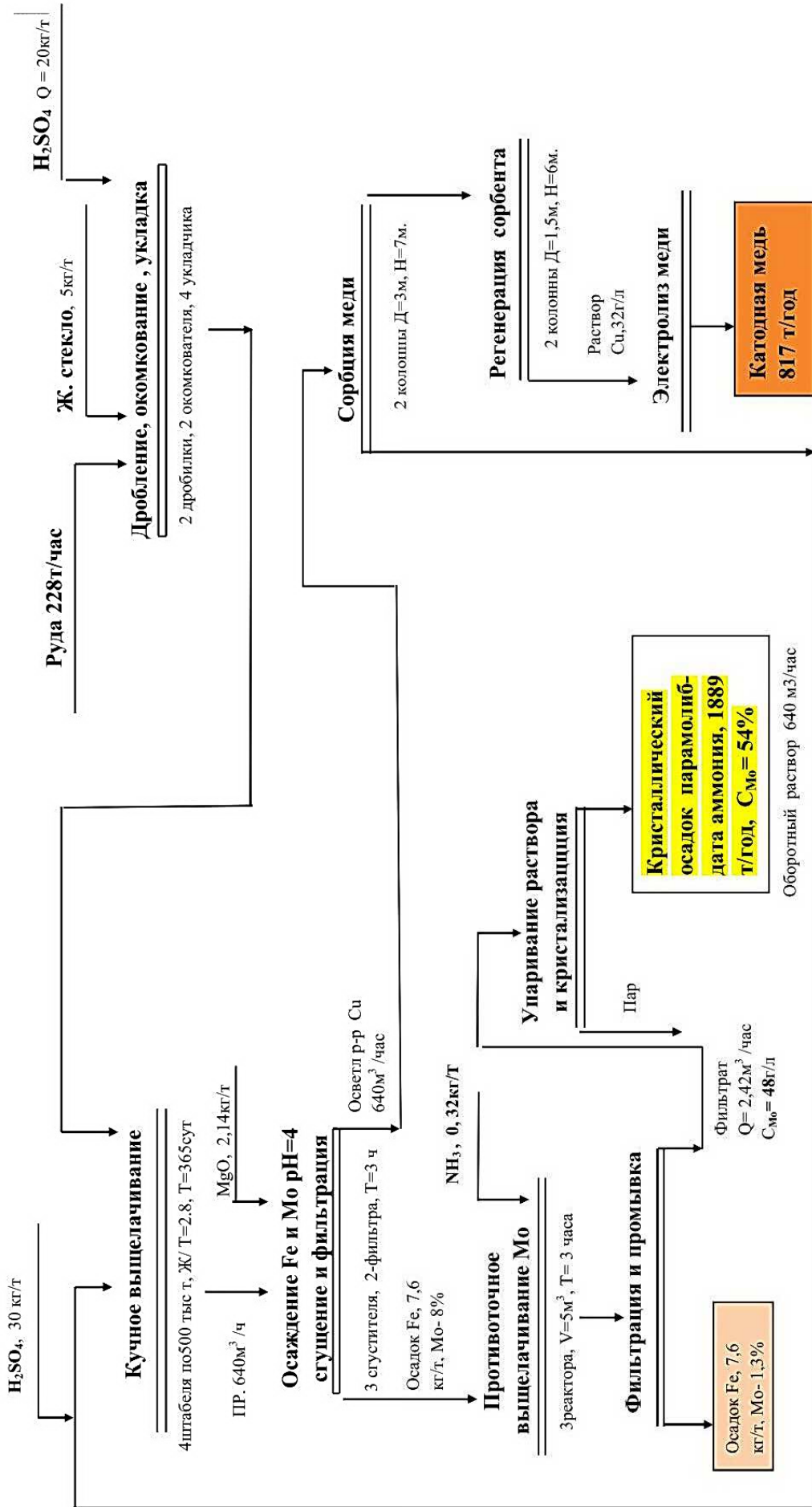


Рисунок 2. Технологическая схема сернокислотного КВ окисленных медно-молибденовых руд

- выщелачивание аммиачным раствором Мо из осадка с переводом его в парамолибдат аммония;
- отделение раствора от осадка сгущением пульпы и фильтрации сгущенного продукта;
- направление осадка в отвал, а раствора на упаривание и кристаллизацию парамолибдата аммония;
- сорбцию меди хелатным катионитом Lewatit TP 207 Monoplus;
- десорбцию меди со смолы раствором серной кислоты;
- конверсию смолы в натриевую форму;
- электролиз десорбата с получением катодной меди М0К ГОСТ 546-2001.

Проверка разработанной схемы проводилась на окисленном рудном материале с содержанием меди 0,06 % и молибдена 0,12 %, измельченном до крупности –5 мм. При грануляции концентрированная серная кислота подавалась из расчета 20 кг/т руды, а жидкое стекло — 5 кг/т. Перколяционное выщелачивание, моделирующее процесс КВ, проводилось раствором серной кислоты с концентрацией 20 г/л.

При достижении отношения Ж/Т = 2,8 извлечение в сернокислотный раствор составило для молибдена 75 % и меди 63 %. Удельный расход серной кислоты на грануляцию и выщелачивание составил около 50 кг/т руды.

Нейтрализация продуктивного раствора раствором едкого натра привела к осаждению молибдена при pH = 4,1 — на 97 %. Осадок отфильтровали и высушили, выход осадка составил 5 г/л. Содержание Мо в осадке — 8 %. Из высушенного осадка Мо извлекали 15 %-ным раствором аммиака. Нейтрализованный раствор КВ, содержащий медь, отправлялся на сорбцию. Емкость смолы по меди составила 20 г/л, а коэффициент концентрирования меди — 100.

Разработанная технология сернокислотного выщелачивания при совместном осаждении железа и молибдена обеспечивает весьма высокие показатели для кучного выщелачивания бедных окисленных руд (медно-молибденовых Сорского и Михеевского месторождений): сквозное извлечение меди и молибдена не менее 60 % при отношении Ж/Т = 2,8 и удельном расходе серной кислоты на окомкование и выщелачивание 50 кг/т руды.

С различными вариантами технологического режима применительно к конкретному сырью предлагаемая технология может быть рекомендована для переработки окисленных руд: силикатных медно-никелевых Еланского и Улкинского; медно-кобальтовых Дергамышского, медно-цинковых Учалинского, ванадиево-железно-медных Волковского и других месторождений для обоснования вовлечения в переработку отвалов бедных окисленных комплексных медных руд.

**Исходные данные для определения экономической эффективности  
выщелачивания молибдена и меди из отвалов окисленных руд  
Сорского месторождения**

На основании результатов, проведенных лабораторных технологических экспериментов по КВ окисленных руд Сорского месторождения и переработке продуктивных растворов для технико-экономической оценки рентабельности переработки бедных комплексных медно-молибденовых руд, были определены исходные данные на предприятии КВ годовой мощностью по руде — 2 млн т/год (таблица).

Таблица

Исходные данные для технико-экономической оценки рентабельности переработки  
бедных комплексных медно-молибденовых руд

| № п/п     | Наименование операций и параметров                                     | Ед. изм.                                        | Значения       |
|-----------|------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------|
| <b>1.</b> | <b>Запасы</b>                                                          |                                                 |                |
| 1.1       | Запасы руды                                                            | млн т                                           | 26,8           |
| 1.2       | Содержание молибдена в руде                                            | %                                               | 0,081          |
| 1.3       | Запасы молибдена                                                       | тыс. т                                          | 21,71          |
| 1.4       | Содержание меди в руде                                                 | %                                               | 0,067          |
| 1.5       | Запасы меди                                                            | тыс. т                                          | 17,95          |
| 1.6       | Извлекаемые запасы молибдена                                           | тыс. т                                          | 13,68          |
| 1.7       | Извлекаемые запасы меди                                                | тыс. т                                          | 10,95          |
| <b>2.</b> | <b>Рудоподготовка</b>                                                  |                                                 |                |
| 2.1       | Производительность дробления руды, грануляции и укладки в штабели      | тыс. т/год<br>т/час                             | 2 000<br>228   |
| 2.2.      | Количество штабелей руды по 500 тыс. т руды в год                      | шт.                                             | 4              |
| 2.3       | Удельный расход серной кислоты на грануляцию 1 т руды                  | кг                                              | 20             |
| 2.4       | Удельный расход жидкого стекла на 1 т руды                             | кг                                              | 5              |
|           | <u>Оборудование</u>                                                    |                                                 |                |
| 2.5       | Дробилки с производительностью 150 т руды/час                          | шт.                                             | 2              |
| 2.6       | Гранулятор с производительностью 150 т руды/час                        | ->-                                             | 2              |
| 2.7       | Штабелеукладчик с производительностью 75 т/час                         | ->-                                             | 4              |
| <b>3.</b> | <b>Кучное сернокислотное выщелачивание</b>                             |                                                 |                |
| 3.1       | Степень извлечения Мо в раствор                                        | %                                               | 75             |
| 3.2       | Степень извлечения Си в раствор                                        | %                                               | 63             |
| 3.3       | Отношение Ж/Т                                                          | —                                               | 2,8            |
| 3.4       | Производительность по растворам                                        | тыс. м <sup>3</sup> /год<br>м <sup>3</sup> /час | 5 600<br>640   |
| 3,5       | Концентрация серной кислоты в растворе                                 | г/л                                             | 5–20           |
| 3.6       | Удельный расход серной кислоты на выщелачивание на 1 т руды            | кг                                              | 30             |
| 3.5       | Средняя концентрация в продуктивном растворе:<br>– молибдена<br>– меди | г/л<br>г/л                                      | 0,216<br>0,151 |

| № п/п     | Наименование операций и параметров                                                       | Ед. изм.            | Значения     |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|--------------|
| 3.6       | Насосы центробежные кислотостойкие погружные производительностью 200 м <sup>3</sup> /час | шт.                 | 8            |
| 3.7       | Грунтовые емкости в кислотостойком исполнении объемом 1000 м <sup>3</sup>                | шт.                 | 2            |
| <b>4.</b> | <b>Осаждение Мо и железа из ПР магнезией (каустическим магнезитом) при рН=4</b>          |                     |              |
| 4.1       | Выход железистого осадка на 1 м <sup>3</sup> ПР (по сухому)                              | кг                  | 2,5          |
| 4.2       | Влажность осадка                                                                         | %                   | 50           |
| 4.3       | Содержание Мо в осадке-концентрате                                                       | %                   | 8,0          |
| 4.4       | Удельный расход магнезии:<br>– на 1 м <sup>3</sup> ПР<br>– на 1 кг Мо                    | кг<br>кг            | 0,84<br>4,2  |
| 4.5       | Время осаждения                                                                          | час                 | 3            |
| 4.6       | Фильтрация и промывка сгущенного влажного осадка                                         | т/час               | 3,2          |
| 4.7       | Производительность по объединенному фильтрату и осветленному продукту                    | м <sup>3</sup> /час | 640          |
| 4.8       | Сгуститель радиальный объемом 250 м <sup>3</sup>                                         | шт.                 | 3            |
| 4.9       | Бункер-дозатор магнезии объемом 15 м <sup>3</sup>                                        | ->-                 | 1            |
| 4.10      | Фильтр-пресс на производительность по осадку 96 т/сутки                                  | ->-                 | 2            |
| <b>5.</b> | <b>Противоточное выщелачивание молибдена в каскаде из трех реакторов</b>                 |                     |              |
| 5.1       | Производительность по 15 % раствору аммиака                                              | м <sup>3</sup> /час | 0,8          |
| 5.2       | Производительность по влажному осадку-концентрату                                        | т/час               | 3,2          |
| 5.3       | Отношение Ж/Т                                                                            | м <sup>3</sup> /т   | 1,5          |
| 5.4       | Время выщелачивания в реакторах                                                          | час                 | 3            |
| 5.5       | Количество стадий                                                                        | –                   | 3            |
| 5.6       | Фильтрация и промывка выщелоченного осадка                                               | т/час               | 3,2          |
| 5.7       | Выход объединенного фильтрата                                                            | м <sup>3</sup> /час | 2,4          |
| 5.8       | Концентрация Мо в фильтрате                                                              | кг/м <sup>3</sup>   | 49           |
| 5.9       | Концентрация парамолибдата аммония в фильтрате                                           | ->-                 | 90           |
| 5.10      | Удельный расход аммиака на 1 кг Мо                                                       | кг                  | 0,63         |
| 5.11      | Степень извлечения Мо в фильтрат                                                         | %                   | 84           |
| 5.12      | Реактор с мешалкой объемом 5 м <sup>3</sup> в последовательном каскаде                   | шт.                 | 3            |
| 5.13      | Фильтр-пресс на производительность по осадку 96 т/сутки                                  | шт.                 | 2            |
| <b>6.</b> | <b>Упаривание раствора и кристаллизация парамолибдата аммония</b>                        |                     |              |
| 6.1       | Упаривание воды из 2,4 м <sup>3</sup> /час фильтрата                                     | м <sup>3</sup> /час | 1,8          |
| 6.2       | Выход упаренного раствора                                                                | ->-                 | 0,6          |
| 6.3       | Концентрация парамолибдата в упаренном растворе                                          | г/л                 | 400          |
| 6.4       | Охлаждение в кристаллизаторе с водяным охлаждением                                       | час                 | 4            |
| 6.5       | Фильтрация и промывка кристаллов парамолибдата                                           | час                 | 4            |
| 6.6       | Сушка кристаллического парамолибдата                                                     | час                 | 4            |
| 6.7       | Выход товарного парамолибдата аммония                                                    | кг/час<br>т/год     | 216<br>1 889 |
| 6.8       | Выход по молибдену                                                                       | т/год               | 1 020        |
| 6.9       | Степень извлечения Мо из ПР в товарный парамолибдат аммония                              | %                   | 84           |
| 6.10      | Степень извлечения Мо из руды в товарный парамолибдат аммония                            | %                   | 63           |

| № п/п               | Наименование операций и параметров                                        | Ед. изм.            | Значения  |
|---------------------|---------------------------------------------------------------------------|---------------------|-----------|
| <b>Оборудование</b> |                                                                           |                     |           |
| 6.11                | Выпарная установка производительностью 2 т/час пара                       | шт.                 | 1         |
| 6.12                | Водяной кристаллизатор объемом 1 м <sup>3</sup>                           | ->-                 | 2         |
| 6.13                | Фильтр-пресс на производительность по осадку 6 т/сутки                    | ->-                 | 2         |
| 6.14                | Распылительная сушилка на производительность 6 т/сутки                    | ->-                 | 1         |
| <b>7.</b>           | <b>Сорбция и электролиз меди</b>                                          |                     |           |
| 7.1                 | Производительность по раствору                                            | м <sup>3</sup> /час | 640       |
| 7.2                 | Содержание меди в растворе                                                | кг/м <sup>3</sup>   | 0,151     |
| 7.3                 | Содержание меди в насыщенной смоле                                        | ->-                 | 20        |
| 7.4                 | Поток смолы на сорбцию                                                    | м <sup>3</sup> /час | 4,8       |
| 7.5                 | Минимальное время контакта                                                | час                 | 20        |
| 7.6                 | Загрузка смолы на сорбцию                                                 | м <sup>3</sup>      | 96        |
| 7.6                 | Содержание меди в регенерате                                              | кг/м <sup>3</sup>   | 32        |
| 7.7                 | Минимальное время контакта                                                | час                 | 4         |
| 7.8                 | Загрузка смолы на регенерацию                                             | м <sup>3</sup>      | 19        |
| 7.9                 | Полная загрузка смолы                                                     | м <sup>3</sup>      | 115       |
| 7.10                | Электролиз катодной меди из регенерата                                    | кг/час<br>т/год     | 93<br>817 |
| 7.11                | Степень извлечения меди из руды в катодную медь                           | %                   | 61        |
| 7.12                | Удельный расход серной кислоты на 1 кг меди                               | кг                  | 5         |
| 7.13                | Удельный расход едкого натра на 1 кг меди                                 | кг                  | 3,8       |
| 7.14                | Удельный расход смолы на 1 кг меди                                        | л                   | 0,0024    |
| <b>Оборудование</b> |                                                                           |                     |           |
| 7.15                | Грунтовая емкость в кислотостойком исполнении объемом 1000 м <sup>3</sup> | шт.                 | 1         |
| 7.16                | Насосы кислотостойкие погружные на 300 м <sup>3</sup> /час                | ->-                 | 2         |
| 7.17                | Компрессор воздушный производительностью 8 м <sup>3</sup> /мин            | ->-                 | 1         |
| 7.18                | Колонна сорбционная диаметром 3 м и высотой 7 м                           | ->-                 | 2         |
| 7.19                | Колонна регенерационная диаметром 1,5 м и высотой 6 м                     | ->-                 | 2         |
| 7.20                | Электролизная установка мощностью 1000 т/год катодной меди                | ->-                 | 1         |
| <b>8.</b>           | <b>Удельные расходы реагентов на 1 т руды</b>                             |                     |           |
| 8.1                 | Серная кислота на грануляцию, выщелачивание и регенерацию смолы           | кг                  | 52        |
| 8.2                 | Жидкое стекло                                                             | ->-                 | 5         |
| 8.3                 | Магнезия                                                                  | ->-                 | 2,14      |
| 8.4                 | Аммиак                                                                    | ->-                 | 0,32      |
| 8.5                 | Едкий натр                                                                | ->-                 | 1,5       |
| 8.6                 | Удельный расход смолы марки Lewatit TP 207 Monoplus                       | л                   | 0,001     |
| <b>9.</b>           | <b>Выход твердых отходов на 1 т руды</b>                                  |                     |           |
| 9.1                 | Отработанная руда                                                         | кг                  | 1 000     |
| 9.2                 | Гидратные осадки железа влажные                                           | ->-                 | 15,2      |

**Определение экономической эффективности переработки  
медно-молибденовых руд методом кучного выщелачивания  
на примере окисленных руд Сорского месторождения**

***Описание объекта оценки***

Для экономической оценки эффективности переработки бедных комплексных медно-молибденовых руд были определены исходные данные на примере отвалов окисленных руд Сорского месторождения. Общие запасы отвалов составляют 26,8 млн тонн руды, в которых содержится 21,8 тыс. т молибдена при среднем содержании 0,081 % и 17,95 тыс. т меди при среднем содержании 0,067 %.

Планируемая годовая мощность по переработке отвалов — 2 млн т/год.

Выход товарной продукции при переработке руды в объеме 2 млн т/год составит:

- парамолибдат аммония — 1 889 т/год
- медь катодная — 817 т/год.

***Расчет капитальных затрат и себестоимости производства***

Объемы инвестиций в основное технологическое оборудование переработки медно-молибденовых руд определены прямым счетом по данным специалистов ФГБУ «ВИМС». Прочие статьи затрат на организацию производства определены по укрупненным показателям с учетом намечаемой производительности по добыче и переработке.

Производственный комплекс будет включать в себя следующие промышленные площадки — участок рудоподготовки, участок сернокислотного выщелачивания, участок осаждения Мо и железа из ПР, участок противоточного выщелачивания молибдена, участок упаривания раствора и кристаллизации парамолибдата аммония, участок сорбции и электролиза меди.

Общие оценочные инвестиции на организацию производства определены в размере 1 247,2 млн руб. В экономических расчетах применена средняя цена на катодную медь — 311 тыс. руб./т и средняя цена на парамолибдат аммония — 1 246 тыс. руб./т по состоянию на ноябрь 2018 г.

Эксплуатационные затраты определены с учетом затрат на переработку руды до получения конечной товарной продукции. Себестоимость переработки 1 тонны руды составила 1 123 руб.

Расчетный период принят продолжительностью в 15 лет, в т.ч. инвестиционная фаза — 2 года, период выхода на полную производственную мощность — 2 года и период работы на полной производственной мощности — 12 лет.

Все расчеты ведутся по ценам на товарную продукцию, технику и оборудование, материалы и энергоресурсы без учета НДС. Расчет фонда оплаты труда персонала выполнен на основе данных Росстата за

2017–2018 гг. о среднемесячной заработной плате по субъектам Российской Федерации и о среднемесячной заработной плате по видам экономической деятельности (металлургическое производство и производство готовых металлических изделий). Среднемесячная заработная плата работников на металлургическом производстве в Республике Хакасия определяется в значении 49,01 тыс. руб., что принято за основу для расчета ФОТ.

Ставки налогов, сборов и платежей, используемые в технико-экономических расчетах: налог на прибыль — 20 %; ставка налога на имущество — 2,2 % от остаточной стоимости основных фондов предприятия; ставка налога на добычу полезных ископаемых — 8 % от стоимости добытых полезных ископаемых; плата за выбросы загрязняющих веществ и за размещение отходов — 1,5 % от эксплуатационных затрат; НДС — 13 %; ставки страховых взносов в Пенсионный Фонд Российской Федерации — 22 %, в Фонд социального страхования Российской Федерации — 2,9 %, в Федеральный фонд обязательного медицинского страхования — 5,1 %; страховые тарифы на обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний принимаются согласно закона от 22.12.2005 № 179-ФЗ — 1,9 %.

Стоимость вспомогательных материалов, реагентов и энергетических ресурсов принята по стоимости продукции, действующей на рынке РФ, в ценах 2018 г.

Укрупненная калькуляция годовых затрат на переработку отвалов медно-молибденовых руд представлена в таблице 1.

Таблица 1

Годовые затраты на переработку отвалов медно-молибденовых руд

| Статьи затрат                | Затраты, млн руб. |
|------------------------------|-------------------|
| Разработка руды              | 27,4              |
| Материалы и реагенты         | 980,2             |
| Амортизация                  | 98,5              |
| Энергозатраты                | 120,8             |
| Текущий ремонт               | 27,2              |
| Заработная плата             | 118,8             |
| Начисления на зарплату       | 37,9              |
| Налоги (в т.ч. НДС)          | 239,0             |
| Общепроизводственные расходы | 368,7             |
| Общехозяйственные расходы    | 223,0             |
| Коммерческие расходы         | 3,6               |
| <b>ИТОГО</b>                 | <b>2 245,6</b>    |

Для обеспечения стабильной работы предприятия, величина оборотных средств (запасы сырья, материалов и запчасти) принимается равной величине двух месячных операционных расходов и учитывается в расходной части первых лет эксплуатации и в доходной части последнего расчетного года.

### Экономические показатели

В результате переработки отвалов медно-молибденовых руд в объеме 2 млн т/год по предложенной технологической схеме при выходе на полную производственную мощность предполагается получение годовой выручки в размере:

- 2 353,4 млн руб. от реализации 1 889 тонн парамолибдата аммония;
- 254,1 млн руб. от реализации 817 тонн катодной меди.

Основные показатели экономической эффективности за расчетный период характеризуются положительными значениями (таблица 2).

Таблица 2

Основные показатели экономической эффективности

|                                                          |       |       |
|----------------------------------------------------------|-------|-------|
| Внутренняя норма доходности                              | 20,4  |       |
| Ставка дисконтирования                                   | 15,0% | 10,0% |
| Индекс доходности                                        | 1,25  | 1,59  |
| Недисконтированный срок окупаемости капитальных вложений | 5,8   | 5,8   |
| Дисконтированный срок окупаемости капитальных вложений   | 9,4   | 7,5   |
| ЧДД                                                      | 395,3 | 961,7 |

Детализированные технико-экономические показатели представлены в таблице 3.

Таблица 3

Технико-экономические показатели

| №№ п/п | Наименование показателей                                                             | Единица измерения | Значение                           |                                            |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|------------------------------------|--------------------------------------------|
|        |                                                                                      |                   | За расчетный период                | На год выхода на производственную мощность |
| 1      | Руда                                                                                 | тыс. т            | 26 800,0                           | 2 000,0                                    |
| 2      | Содержание полезных компонентов в оцениваемых ресурсах                               |                   |                                    |                                            |
|        | Медь — Cu                                                                            | %                 | 0,067                              |                                            |
|        | Парамолибдат аммония (NH <sub>4</sub> ) <sub>6</sub> Mo <sub>7</sub> O <sub>24</sub> | %                 | 0,081                              |                                            |
| 3      | Расчетный период                                                                     | лет               | 14 лет в т.ч. 2 года строительства |                                            |
| 4      | Продукция                                                                            |                   |                                    |                                            |
|        | Медь катодная ГОСТ 546-2001                                                          | тыс. т            | 10 947,8                           | 817,0                                      |
|        | Парамолибдат аммония ГОСТ 3765-78                                                    | тыс. т            | 25 312,6                           | 1 889,0                                    |
| 5      | Капитальные затраты с учетом реинвестиций                                            | млн руб.          | 1 678,6                            |                                            |
| 6      | Товарная продукция                                                                   | млн руб.          | 34 941,6                           | 2 607,6                                    |
|        | Медь катодная ГОСТ 546-2001                                                          | млн руб.          | 3 404,4                            | 254,1                                      |
|        | Парамолибдат аммония ГОСТ 3765-78                                                    | млн руб.          | 31 537,2                           | 2 353,4                                    |



| №№<br>п/п                      | Наименование показателей                     | Единица<br>измерения | Значение                           |                                                  |
|--------------------------------|----------------------------------------------|----------------------|------------------------------------|--------------------------------------------------|
|                                |                                              |                      | За<br>расчетный<br>период          | На год выхода на<br>производственную<br>мощность |
| 7                              | Эксплуатационные расходы                     | руб./т руды          |                                    | 1 122,8                                          |
|                                | – разработка руды                            |                      | 14,0                               |                                                  |
|                                | – материалы и реагенты                       |                      | 490,1                              |                                                  |
|                                | – энергозатраты                              |                      | 60,4                               |                                                  |
|                                | – текущий ремонт                             |                      | 13,6                               |                                                  |
|                                | – амортизация                                |                      | 49,3                               |                                                  |
|                                | – заработная плата                           |                      | 59,4                               |                                                  |
|                                | – начисления на зарплату                     |                      | 18,9                               |                                                  |
|                                | – налоги и платежи                           |                      | 119,3                              |                                                  |
|                                | – общепроизводственные расходы               |                      | 184,4                              |                                                  |
|                                | – общехозяйственные расходы                  |                      | 111,5                              |                                                  |
|                                | – коммерческие расходы                       |                      | 1,8                                |                                                  |
|                                | 8                                            |                      | Полные затраты за расчетный период | млн руб.                                         |
| – разработка руды              |                                              | млн руб.             | 374,3                              | 27,9                                             |
| – материалы и реагенты         |                                              | млн руб.             | 13 134,0                           | 980,2                                            |
| – энергозатраты                |                                              | млн руб.             | 1 619,2                            | 120,8                                            |
| – текущий ремонт               |                                              | млн руб.             | 363,9                              | 27,2                                             |
| – амортизация                  |                                              | млн руб.             | 1 338,2                            | 98,5                                             |
| – заработная плата             |                                              | млн руб.             | 1 592,0                            | 118,8                                            |
| – начисления на зарплату       |                                              | млн руб.             | 507,7                              | 37,9                                             |
| – налоги и платежи             |                                              | млн руб.             | 3 202,4                            | 239,0                                            |
| – общепроизводственные расходы |                                              | млн руб.             | 4 941,0                            | 368,7                                            |
| – общехозяйственные расходы    |                                              | млн руб.             | 2 988,6                            | 223,0                                            |
| – коммерческие расходы         |                                              | млн руб.             | 47,8                               | 3,6                                              |
| 9                              | Цена товарной продукции                      |                      |                                    |                                                  |
|                                | Медь катодная ГОСТ 546-2001                  | руб./т               |                                    | 310 963,1                                        |
|                                | Парамолибдат аммония<br>ГОСТ 3765-78         | руб./т               |                                    | 1 245 921,6                                      |
| 10                             | Затраты на 1 руб. товарной продукции         | руб.                 | 0,9                                | 0,9                                              |
| 11                             | Валовая прибыль                              | млн руб.             |                                    | 4 832,6                                          |
| 12                             | Налог на имущество                           | млн руб.             |                                    | 182,6                                            |
| 13                             | Налогооблагаемая прибыль                     | млн руб.             |                                    | 4 650,1                                          |
| 14                             | Налог на прибыль                             | млн руб.             |                                    | 930,0                                            |
| 15                             | Чистая прибыль                               | млн руб.             |                                    | 3 720,0                                          |
| 16                             | Внутренняя норма доходности                  | %                    |                                    | 20,4                                             |
| 17                             | Срок окупаемости (простой)                   | лет                  |                                    | 5,8                                              |
| 18                             | Ставка дисконтирования                       | %                    |                                    | 15,0                                             |
| 18.1.                          | Чистый дисконтированный доход                | млн руб.             |                                    | 395,3                                            |
| 18.2.                          | Индекс доходности                            |                      |                                    | 1,2                                              |
| 18.3.                          | Дисконтированный срок окупаемости инвестиций | лет                  |                                    | 9,4                                              |
| 19                             | Ставка дисконтирования                       | %                    |                                    | 10,0                                             |
| 19.1.                          | Чистый дисконтированный доход                | млн руб.             |                                    | 961,7                                            |
| 19.2.                          | Индекс доходности                            |                      |                                    | 1,6                                              |
| 19.3.                          | Дисконтированный срок окупаемости инвестиций | лет                  |                                    | 7,5                                              |

Из представленных технико-экономических показателей следует, что определяющим фактором влияния является цена на парамолибдат аммония.

При данных показателях экономической эффективности проект переработки отвалов окисленных руд Сорского месторождения можно рассматривать как в достаточной степени эффективный.

Подписано в печать 20.10.2020 г.  
Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 3,39  
Тираж 10 экз. Заказ № 13

Редакционно-издательский сектор (РИС) ВИМС.  
119017, Москва, Старомонетный пер., д. 31. Тел. (495) 9503570  
Отпечатано на ризографе в РИС ВИМС.