© В.Ж. Аренс, А.С. Черняк, 2006

УДК 622.001

В.Ж. Аренс, А.С. Черняк

ХИМИЯ И МИКРОБИОЛОГИЯ В СФЕРЕ ГОРНОГО ДЕЛА

Семинар № 18

Современное горное дело обслуживает обширная и достаточно развитая наука. Ее практическая и теоретическая значимость широко известна. Сейчас, во многом, вокруг горного дела группируются и интересы общества.

Решение проблем горной науки может успешно осуществляться только на основе взаимодействия с другими науками. Можно предположить, что будущие успехи горного дела связаны также и с успехами химии, изучающей процессы превращения веществ в результате реакций, происходящих под влиянием различных факторов и взаимодействий. Так, например, в последние годы практически весь мировой прирост добычи золота связан с кучным выщелачиванием золота и использованием микроорганизмов в процессе обогащения (1). Для повышения извлечения нефти активно используются поверхностно активные вещества (2), на достижения химии опираются широко освоенные методы подземного скважинного выщелачивания урана (3), химического обогащения многих полезных ископаемых (4), методов защиты окружающей среды (5).

Связь химии и микробиологии с горным делом всеобъемлюща, и они будут все шире проникать во все аспекты его деятельности. Современная химия со своими методами, концепциями и, конечно, продукцией смотрит в будущее, но для этого нужны исследования по многим направлениям, а разработка новых технологий в химии требует огромных материальных затрат на теоретическую разработку новых идей, их лабораторную проверку и опытно-промышленную апробацию.

Нам представляется, что междисциплинарные исследования в горной науке, где химия является «повитухой», дадут новую жизнь горному делу и, особенно, физико-химическим методам (ФХМ) добычи полезных ископаемых (6).

Что представляет собой полезное ископаемое? Это физико-химическая система, состоящая из элементов, существующих в определенной физико-химической обстановке. Часть элементов это нужные людям полезные ископаемые, но они находятся в связи с другими элементами, которые не нужны, а иногда и просто вредны (не позволяют повысить извлечение). И здесь именно химия и микробиология могут нам помочь эффективно извлечь нужные полезные ископаемые из месторождений.

В свое время академик Н.В. Мельников (7) высказал мысль, что нужно искать новые физико-химические технологии добычи полезных ископаемых, обратные процессу их образования, которые связаны с магматизмом, поверхностными преобразованиями и метаморфизмом.

В каждой физико-химической технологии существует глубокая связь с окружающими условиями, в которых про-

исходит постепенная замена одних равновесий другими и которые позволяют извлечь на поверхность земли нужные элементы. Для успешного осуществления этих процессов и нужна химия, которая изучает все возможные (теоретически допускаемые) сочетания элементов, изменяя различным образом условия их существования. К сожалению, всех факторов, влияющих на физико-химический процесс превращения, учесть невозможно, поэтому исследователю необходимо упрощать задачу, учитывая только главные для этого явления факторы.

Грубо говоря, химики совместно с горняками должны быть в состоянии получить любые желаемые элементы из природных месторождений, они должны найти способы избирательного воздействия для выделения и получения нужных элементов при инертности рабочих реагентов к вмещающим породам.

Рассмотрим основные направления, проблемы и задачи химических и микробиологических методов в горном деле. От уровня решения химических проблем зависят прогресс и внедрение новых технологий добычи и обогащения минерального сырья. Ключевое значение, при этом, имеют экономичные, экологически приемлемые избирательные растворители минералов [8-9]. Перспективны неорганические, органические и смешанные растворители. Трудность нахождения подходящих растворителей обусловлена многообразием и специфичностью протекающих при выщелачивании минералов физических и химических процессов, образно говоря, многоликостью их механизмов. Достигнутый уровень предсказания нужных растворителей является полуэмпирическим. Перспективен поиск общих подходов к нахождению условий синергизма кислотно-основных, окислительно-восстановительных и других свойств смешанных растворителей. Залог успеха проблемы растворителя – в углубленном внимании к особенностям изменения физических, физико-химических и химических свойств и характеристик изучаемых систем. Нужны растворители, сочетающие легкость выщелачивания и химического разложения минералов с избирательностью действия.

В качестве избирательных растворителей обычно используют слабые кислоты и кислоты средней силы, растворы солей, дающих в водных растворах кислую или щелочную реакции. В подборе растворителей важную роль играют теории кислот и оснований, позволяющие обоснованно подойти к получению смесей реагентов различной агрессивности, т.е. к основному свойству при выборе избирательных выщелачивающих агентов. Из этих же теорий вытекает целесообразность применения в будущем неводных растворов в качестве среды для выщелачивания минералов, что позволяет усиливать или ослаблять агрессивность кислот и щелочей. Описанию кислотно-основных взаимодействий при растворении и выщелачивании способствует представление о кислотах и основаниях как донорах и акцепторах водородной связи. Такой подход к сущности кислот и оснований вызван тем, что есть структуры и процессы, для которых схема с переносом протонов малопригодна, а электроннопарное приближение не приводит к количественным результатам. Так, в трехмерных структурах воды и других ассоциированных водородными связями растворителей, не происходит переноса протона в общем понимании. Несомненно, эта более широкая концепция кислот и оснований имеет значение для изыскания и подбора растворителей минералов.

Изменение структурированности растворителя влияет на гомогенные и гетерогенные равновесия и, в частности, на кислотность растворов. Для исследования кислотности водных, смешанных и неводных растворов широко применяется функция кислотности Гаммета (H0), характеризующая протонодонорную способность среды и активность протона в растворах. Гидратация протонов значительно более чувствительна к изменению состояния водной среды, чем гидратация других частиц, молекулярных или иных форм в растворе. Увеличение структурированности воды в растворах приводит к росту гидратации протона и уменьшению протонодонорной способности среды, а перестройка и нарушение структуры воды ведет к уменьшению гидратации протона и росту протонодонорной способности среды. Взаимосвязь между структурой растворов, с одной стороны, и кислотностью, с другой, а также взаимная зависимость изменений этих характеристик раствора при введении в него растворяемых веществ позволяет, изменяя одну из них, изменять другую и тем самым направленно смещать кислотно-основное равновесие, а следовательно, в определенной степени управлять протеканием процесса.

Для развития обоснованных подходов к выбору растворителей может иметь значение эмпирический принцип жесткости и мягкости кислот и оснований (ЖМКО). По Р.Дж. Пирсону, строгое определение жесткости ионов в водном растворе по существу совпадает с определением их активности в водной среде, что объясняет полезность анализа процесса растворения с таких позиций.

Действенным методом изыскания подходящих растворителей является физико-химическое моделирование процессов растворения и выщелачивания на ЭВМ, особенно в связи с возможностью использования минимизации не только энергии Гиббса, но и других термодинамических потенциалов (работы И. К. Карпова с сотр. [10]).

Представляют интерес полученные эмпирическим путем показатели полярности растворителей. В основу определения таких показателей положены данные о процессах, которые зависят от сольватации и исследуются в различных растворителях, например, константы равновесия или максимумы поглощения в спектрах веществ, принятых за стандартные, по сравнению с этими же параметрами у изучаемых растворителей. Предложены также эмпирические параметры для выбора растворителей на основе их донорно-акцепторных свойств. Введены параметры донорного (DN) и акцепторного (AN) чисел. Появление эмпирических шкал донорных и акцепторных свойств растворителей обусловлено трудностью теоретического учета совместного действия уни-версальной и специфической сольватации. По идее, для натурного - кучного и подземного - выщелачивания экологически чистыми и избирательными растворителями являются природные растворы и химические соединения биосферы: минерализованные насыщенные углекислотой воды, гуминовые соединения, излив минеральных источников, продукты жизнедеятельности микроорганизмов, выделенные из вод и каменного материала. Но, к сожалению, растворяющая способность многих из них редко удовлетворяет предъявляемым технологией требованиям. Кроме того, стремление к комплексному извлечению ценных компонентов из сырья и, по сути дела, необходимость этого обусловливает использование более агрессивных химических реагентов.

Недостатком подземного и кучного фильтрационного выщелачивания является его невысокая скорость. Для повы-

шения ее нужно использовать все возможности физико-химической гидродинамики и кинетики выщелачивания, методы катализа и механохимической активации [9]. При разработке способов подземного выщелачивания следует учитывать факт активации минеральных веществ в геологических условиях, которая является, как известно, одной из главных причин изменения горных пород. Механическая активация [11] протекает в глобальных масштабах под влиянием горного давления выше лежащих толщ и тектонических процессов и приводит к изменению структуры и состава пород - динамометаморфизму, в том числе деструктивному с дроблением и перетиранием горных пород. Большой запас поверхностной энергии и высокое значение энтропии имеют продукты химического выветривания горных пород. До 80% всей массы осадочных пород составляют активированные при дроблении и измельчении тонкодисперсные (пелитовые) отложения. Активация продолжается и при литогенезе - образовании сцементированных плотных осадочных пород из рыхлых отложений.

Для повышения экономичности применяемых методов выщелачивания необходимо решать задачи регенерации реагентов. Методы регенерации реагентов разработаны и используются в практике с повторным использованием реагентов в технологическом процессе (в обороте), что резко снижает их расход и себестоимость всего передала, повышает экологичность технологии [4, 9]. Ряд методов решает эту задачу при подземном и кучном выщелачивании.

Имеется значительное различие между ролью протекающих при выщелачивании вторичных процессов в заводской технологии и физико-химической геотехнологии. При заводском выщелачивании (химическое обогащение и гидрометаллургия) нежелательные снижающие извлечение вторичные процессы выделения растворенного вещества из жидкой фазы пульпы могут быть предотвращены или сведены к минимуму нахождением оптимальных технологических условий. Кроме того, в этом случае вторичные явления часто не оказывают большого влияния на конечные показатели передела. В физико-химическом методе добычи, напротив, протекание вторичных процессов является составной частью динамики фильтрационного выщелачивания (подземного, кучного, перколяционного) и поэтому требует особого внимания. Они связаны с продвижением физико-химических, в том числе температурных, кислотно-основных и других барьеров (по А.И.Перельману, В.С. Голубеву, Г.Х. Хчеяну и др.).

Для описания динамики процессов фильтрационного выщелачивания целесообразно использовать преобразование Фурье [9], которое является мощным инструментом при выполнении различных научных исследований, позволяющим корректно интерпретировать экспериментальные данные. Информацию о фильтрационном выщелачивании можно кодировать с помощью экспериментально полученных пар чисел, в частности, данных о содержании выщелачиваемого вещества и о фронте продвижения процесса по простиранию, либо мощности рудного тела.

Для углубленного изучения динамики процессов натурного выщелачивания полезно использовать подходы и возможности синергетики, достигшей определенного прогресса в развитии теории динамических сильно неравновесных открытых физико-хими-ческих систем. Сложны, но решаемые задачи химических, в том числе микробиологических, воздействий на формирование и подго-

товку к эксплуатации техногенных месторождений.

При поиске методов и конкретных способов извлечения ценных элементов и примесей из технологических растворов выщелачивания следует шире и гибко использовать сорбционно-экстракционные, электрохимические и мембранные процессы, неорганические иониты, электронобменные смолы и волокна, а также безреагентные способы осаждения с применением ускорителей электронов.

Химико-экологические проблемы выщелачивания и обогащения подробно рассмотрены нами ранее [12-14]. Данные мониторинга окружающей среды, освоение и внедрение эффективных методов анализа воздуха, природных и сточных вод, выбросов производств и транспорта, публикация ранее недоступных общественности сведений подчеркивают остроту этих проблем и неотложность их решения. Многие данные опять-таки приводят к мысли о необходимости развития не заводских - геотехнологических методов переработки полезных ископаемых.

При разработке методов кучного и подземного выщелачивания и оптимизации технологических процессов, прогнозировании и оценке результатов следует более широко использовать технологическую минералогию. Полезны также достижения и подходы генетической минералогии, рассматривающей стадийность и динамику образования минералов и горных пород. Как уже говорилось, многие рациональные процессы переработки руд и разрушения минералов противоположны по направлению процессам, происходившим при их образовании.

Неотложная научная задача - разработка надежных и достаточно простых методов исследования кинетики гетерогенных процессов в характерных для технологии многокомпонентных и многофазных системах. В этой области не преодолен существенный разрыв между высоким уровнем общетеоретических построений и возможностями их применения для изучения кинетики конкретных процессов, хотя интенсивно развиваются феноменологические теории и расширяется круг методов [9].

Внедрение химических методов в технологию обогащения - неизбежный процесс, связанный с природой самого минерального сырья и наблюдаемым ухудшением его состава. Включение этих методов в схемы обогащения - реальный путь интенсификации технологии переработки руд и россыпей, повышения полноты их использования, улучшения состава товарных концентратов. Оно позволяет преодолеть трудности обогащения тех видов сырья, которые отличаются комплексностью состава, тонким взаимопрорастанием или близостью свойств минералов, способностью к шламообразованию. Каждый их этих факторов затрудняет извлечение ценных минералов, снижает качество концентратов или приводит к осложнениям, предотвратить которые обычными методами почти невозможно.

Наряду с развитием комбинированных схем, сочетающих основанное на разделении свободных минеральных зерен механическое обогащение и химические операции, постоянно возрастает роль химических методов и концепций в совершенствовании всех или большинства обогатительных процессов [3].

Можно ожидать более широкое применение химических подготовительных операций перед механическим обогащением разделяемых минералов, а также компонентов вторичного сырья. Механическое обогащение во многих случаях экономичнее и проще химического и поэтому разумные сочетания этих двух подходов, многообразие конкретных вариантов которых вполне очевидно, имеют не-

сомненное практическое значение. Исключительно велика роль тонких химических методов в дальнейшем прогрессе флотационного обогащения. Логичен поиск даже таких непривычных для обогащения методов, как флотация минералов и прежде всего тонких частиц в неводных средах. Заслуживают внимания флотация под давлением и регулирование флотируемости минералов нанесением искусственных шламовых покрытий на их поверхность.

У обогатителей все чаще будет возникать необходимость воздействия на минералы химическими процессами в экстремальных условиях: при высоких температурах (применение плазмохимии и плазмохимическиой технологии, расплавление вещества или оплавление поверхности частиц), достаточно высоких давлениях, в критических условиях, а также использования различных физических полей, например сверхмощных импульсов «электромагнитного колуна» (по образному выражению прессы при описании оригинальных разработок ИПКОНа РАН, ИРЭ РАН и ЦНИГРИ под руководством академика В. Чантурии и В. Черепнина) и сильных механических воздействий. Последние при тонком измельчении минералов увеличивают их химическую активность, активируют процессы выщелачивания, могут быть полезны как метод предварительной подготовки руд, концентратов, минералов перед многими процессами механического обогащения.

Один из путей повышения показателей механического обогащения - предварительная перекристаллизация рудных продуктов без изменения или с небольшой корректировкой их состава для получения достаточно крупных зерен. Этот процесс, на первый взгляд, производит впечатление экстенсивного, но полезность его становится очевидной, если учесть, что многие новые, не поддающиеся обогащению типы руд отличаются не низким содержанием ценных компонентов, а исключительно тонким и тесным взаимным прорастанием минералов, развитием коллоидных минеральных форм, а также комплексностью состава. Необходимость вовлечения в переработку таких руд возрастает в связи с ухудшением сырьевой базы.

Процесс перекристаллизации экономически близок к пирометаллургическим методам переработки небогатых руд и концентратов цветных и некоторых других металлов. Он во многих случаях является почти безреагентным - исключает наиболее обременительную статью затрат многих химико-технологических процессов, не приводит к получению подлежащих складированию или загрязняющих окружающую среду отвальных продуктов. Закономерен интерес к этому процессу применительно к доводке труднообогатимых промежуточных продуктов и переработке нестандартных комплексных концентратов. Одним из пионеров механического обогащения искусственных минералов был И.Н. Масленицкий, разработавший способ флотационного разделения медно-никелевого файнштейна с высоким содержанием меди на медный и никелевый сульфидные концентраты. Способ внедрен в производство еще в 1957 г. и используется в промышленной практике до настоящего времени. При флотации при pH 12-12,5 получают два сульфидных концентрата - медный (содержит 68-69 % Cu и 8-9 % Ni) и никелевый - хвосты флотации, содержащие 64-66 % Ni и 7-8 % Cu, которые подвергаются доводке.

В Механобре (П.М. Перлов, Н.В. Защихин, А.В. Ескин, П.А. Тациенко, К.М. Асончик) разработан окислительно-сегрегационно-обогатительный процесс (ОСО) для переработки низкосортных

продуктов, получаемых наряду с кондиционными концентратами при обогащении медно-никеле-вых руд Талнахско-Октябрьского месторождения (бедных никель-пирро-тиновых продуктов, выделяемых из вкрапленных, медистых и сплошных сульфидных руд; черновых пирротиновых концентратов, получаемых из сплошных сульфидных руд).

Для решения вопросов перекристаллизации рудных материалов и синтеза искусственных минералов полезен подход А.А. Власова к процессам роста кристаллов. Как справедливо отмечал акад. Н.В.Белов, метрическая теория роста кристаллических структур А.А.Власова близка по своим выводам к теории реального кристаллообразования. В роботах Механобре показана возможность использования этого подхода в технологии химического обогащения [15].

Микробиологические методы охватывают использование микроорганизмов и продуктов их жизнедеятельности применительно к сфере горного дела и связаны с работами института Микробиологии РАН, института сталей и сплавов, Иргиредмета, ЦНИГРИ и других исследовательских центров [16-25]. Они развиваются в следующих направлениях: микробиологическое разложение и выщелачивание минералов и металлов с использованием автотрофных или гетеротрофных микроорганизмов и продуктов их жизнедеятельности (метаболитов); микробиологическое (биохимическое) осаждение металлов и их соединений из растворов; биогетерокоагуляция металлов и минералов (открытие Ф.Д. Овчаренко с соавт. [21]) с последующим их механическим, обычно флотационным обогащением; использование сведений о биогеохимических процессах, которые происходят в земной коре, при решении технологических задач; изучение биокоррозии металлов; изучение и применение явлений биокатализа с участием металлов и их соединений, в том числе, биоэлектрокатализа; изыскание, создание и применение микробиологических методов очистки сточных вод процессов выщелачивания металлов; биомодифицирование минералов и их поверхностей, имеющее значение для обогащения полезных ископаемых и, очевидно, других разделов технологии.

Созданию теоретических основ микробиологических методов и развитию биотехнологии существенно способствует прогресс бионеорганической химии. Так, с её помощью в Иркутском университете в последние годы осуществлён поиск биотехнологических методов извлечения металлов платиновой группы (на примере платины и родия), основанных на растворении их продуктами метаболизма гетеротрофных металлофильных микроорганизмов – аминокислотами и пептидами.

Уже давно открыты микроорганизмы, оказывающие влияние на формирование и изменение месторождений полезных ископаемых. Это послужило толчком для развития исследований по изысканию и применению микробиологических методов в технологии переработки руд и концентратов, содержащих медь, цинк, молибден, уран, марганец и другие металлы. Часть предложенных методов реализуются в промышленности или прошла промышленные испытания.

Начальной операцией в биотехнологии извлечения металлов является микробиологическое разложение или выщелачивание минералов, осуществляемое в разных условиях: чановое (с перемешиванием пульпы или перко-ляционное), кучное, подземное. Кучное выщелачивание золота во всех странах мира пока проводится методом цианирования (этот метод обеспечивает получение более 80

% золота мира). Однако выщелачивание токсичными цианистыми растворами мировая общественность стремиться запретить, поэтому ведутся активные исследования по выщелачиванию золота хлоридами и другими реагентами.

Микробиологические методы, как более экологичные, должны сначала потеснить, а затем заменить процесс цианирования. Продолжаются работы и по поиску бесцианидных растворителей золота и серебра из кеков бактериального выщелачивания.

К настоящему времени наиболее изучены процессы выщелачивания металлов автотрофными микроорганизмами и образующимися при их учас-тии эффективными растворителями и окислителями металлов и минералов. Эти процессы внедрены в производство в нескольких странах, обеспечивают получение значительных количеств меди, золота и других металлов. В России ПО «Полюс» (Красноярский край) в 2001 г. вступило в строй крупное предприятие по переработке данным способом золотосодержащих руд. Имеются определённые успехи по изысканию условий и методов интенсификации выщелачивания. Значительный интерес вызывает использование автотрофных бактерий для избирательного выщелачивания изотопов.

Успешно развиваются работы по выщелачиванию и осаждению металлов гетеротрофными микроорганизмами и продуктами их метаболизма. Выщелачивание ими золота испытано с положительным результатом в опыт-но-промышленном масштабе, технико-экономический анализ подтвердил перспективность и целесообразность использования процесса в заводских и геотехнологических условиях. Из разработанных вариантов технологического процесса первоочерёдное значение для практики имеет выщелачивание простым и дешёвым растворителем – белковыми гидролизатами, полученными из отходов производства и содержащими смесь аминокислот и других белковых остатков. В последующем будет перспективна технология непосредственного выщелачивания золота растворами продуктов метаболизма гетеротрофных микроорганизмов, преимущество которой обусловлено возможностью регулирования состава растворителя путём направленного биосинтеза определённых белков и белковых остатков.

Учеными РФ и других стран создана биосорбционная флотация – прогрессивный технологический метод, применимый к бедным растворам и сточным водам и основанный на избирательном поглощении извлекаемых веществ (ценных металлов или примесей) биологическими сорбентами и флотации биомассы [27].

Разработаны и испытаны сорбционные способы извлечения золота и серебра из гидролизатных и других биотехнологических растворов. Создана и была внедрена на аффинажном заводе технология осаждения истинно растворенного и коллоидного золота, а также металлов – спутников, плесневыми грибами из технологических растворов различного состава. Решена задача избирательного микробиологического извлечения теллура из многокомпонентных растворов.

Активно развиваются исследования по биогетерокоагуляции золота с целью извлечения тонкодисперсного золота путём его избирательного агрегирования микроорганизмами и выделения флокул методами механического обогащения. Наибольший интерес биогетерокоагуляция представляет для переработки коренных руд с тонким золотом. Извлечение образующихся биогетероагрегатов во флотационный концентрат уменьшит потери золота с хвостами флотационных фабрик.

Более эффективно осуществляют биогетерокоагуляцию ассоциативные культуры, состоящие из нескольких различных штаммов, а не монокультуры. Биогетерокоагуляция – основа перспективного метода извлечения не только коллоидного, но и более крупного тонкодисперсного золота из руд и россыпей. Низкие показатели обогащения ряда россыпей давно указывали на значительное содержание в них такого золота. По данным Иргиредмета объектом биогетерокоагуляции в изучавшихся россыпях является золото крупностью на два порядка превышающей размеры коллоидных частиц. Оно образует относительно крупные биоминеральные агрегаты, которые содержат от 7 до 50 г/ т золота, что отвечает степени концентрации в 40-280 раз. Необходим дальнейший поиск оптимальных технических решений эффективного выделения биоагрегатов из пульпы. Перспективен поиск возможностей применения процесса в технологии извлечения других полезных ископаемых.

Целесообразно дальнейшее развитие поисковых и технологических исследований, а также опытных работ по всем определившимся к настоящему времени методам биотехнологии извлечения металлов (микробиологическое разложение и выщелачивание минералов и металлов, биогетерокоагуляция тонкодисперсных частиц, осаждение металлов и их соединений микроорганизмами из растворов, биомодификация минералов).

В связи выявлением биоэлектрокатализа [20] процессов растворения золота в растворах аминокислот и пептидов, целесообразно поставить углублённые исследования по изысканию условий использования этого явления для интенсификации процесса микробиологического выщелачивания золота. Следует изучить и возможность интенсификации процессов микробиологического выщелачивания золотосодержащих сульфидов и минералов других металлов путём использования биокаталитических явлений.

Важнейшая задача – скорейшее выявление оптимальных объектов для применения микробиологических методов извлечения металлов, а для ускорения исследовательских работ в данной области – существенное рас-ширение их объёма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Подземное* и кучное выщелачивание урана, золота и других металлов, (1 и 2 том) под ред. М.И. Фазлуллина, М. «Руда и металлы» 2005
2. *Кудинов В.И.* Совершенствование тепловых методов разработки месторождений высоковязких нефтей, – М.: «Нефть и газ» 1996
3. *Подземное* выщелачивание полиэлементных руд под ред. Н.П. Лаверова,- М. «АГН» 1998
4. *Черняк А.С.* Химическое обогащение руд. - М.: Недра, 1976.- 296 с.; 1987.- 224 с.
5. *Новые* процессы в комбинированных системах обогащения полезных ископаемых.- М: Наука, 1989.
6. *Аренс В.Ж.*. Физико-химическая геотехнология. - М.: Изд-во Моск. горного ун-та, 2001.- 656 с.
7. *Мельников Н.В., Аренс В.Ж.* Проблемы физико-химических методов добычи полезных ископаемых как теоретической дисциплины. Ж. «Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых», №2, 1974.
8. *Минеев Г.Г., Панченко А.Ф.* Растворители золота и серебра в гидрометаллургии. - М.: Металлургия, 1994.- 241 с.
9. *Черняк А.С.* Процессы растворения: выщелачивание, экстракция.- Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1998. - 407 с.
10. *The Convex* Programming Minimization of Five Thermodynamic Potentials Other Than Gibbs Energy in Geochemical Modeling / I.K.Karpov, K.V. Chudnenko, D.A. Kulik and V.A.Byshinskii // American Journal of Science.- 2002.-Vol.302.-April.-P.281-311.

11. *Молчанов В.И., Селезнева О.Г., Жирнов Е.Н.* Активация минералов при измельчении.- М.: Недра, 1988.- С. 145-151.

12. *Аренс В.Ж., Черняк А.С.* Некоторые химико-экологические проблемы геотехнологии // Вестник горно-металлургич. секции АЕН РФ. - М.: 1993. - С. 65 - 71.

13. *Аренс В.Ж., Черняк А.С.* Химико-экологические проблемы выщелачивания // Горный журнал. - 1994. - № 12. - С. 5-7.

14. *Черняк А.С., Аренс В.Ж.* Химические и химико-металлургические проблемы геотехнологии и обогащения руд накануне XXI века // Фундаментальные проблемы российской металлургии на пороге XXI века. Т.3. Металлургия редких и рассеяных элементов. - М.: Российская академия естественных наук, 1999. - С. 94-115.

15. *Никифоров К.А., Ревнивцев В.И.* Направленные превращения минералов.- Новосибирск: Наука, 1992. - 193 с.

16. *Кузнецов С.И., Каравайко Г.И.* Бактериальные методы выщелачивания металлов из руд, изд. ИМ РАН 1970.

17. *Адамов Э.В., Каравайко Г.И.* Процессы бактериального выщелачивания в комбинированной технологии переработки минерального сырья // Горный информа-ционно–аналитический бюл./ Моск. гос. горный ун-т. – 1999. - №2. - С. 25-30.

18. *Биогеотехнология* металлов. Практическое руководство/ Научные редакторы: Г.И. Каравайко (СССР), Дж. Росси(Италия), А. Агате(Индия), С. Груднев (Болгария),З.А. Авакян(СССР). - М.: Центр международных проектов ГКНТ, 1989. - 375 с.

19. *Биотехнология* и бионеорганическая химия благородных металлов: состояние и перспективы/ А.С. Черняк, А.Ю. Сафронов, А.В. Кашевский, Е.А. Туманова//Материалы научно-практической конференции «Химия и химическая технология на рубеже тысячелетий», посвященной 100-летию химико-технолог.фак. Том.политех. ун-та (окт.2000г.) - Томск: Изд-во ТПУ, 2000. - Т.1. - С. 169-172.

20. *Богдановская В.А.* Биоэлектрокатализ: проблемы и перспективы// Электрохимия. - 1993. - Т.29. - №4. - С. 441-447.

21. *Закономерности* избирательной агрегации микроорганизмов и минеральных частиц/ Физико-химическая механика и лиофильность дисперсных систем. - 1985. - №17. - С. 96-103.

22. *Минеев Г.Г.* Биометаллургия золота. - М.: Металлургия, 1989. – 160 с.

23. *Небера В.П., Соложенкин П.М.* Проблемы биотехнологии//Горный информационно–аналитический бюл./ Моск. госуд. горный ун-т. - 1999. - №2. - С. 48-54.

24. *Черняк А.С.* Основы биотехнологии металлов. - Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 2002. – 102 с.

25. *Экология* и геохимическая деятельность микроорганизмов, изд. АНСССР Пущино 1970.

26. *Лодейщиков В.В.* Технология извлечения золота и серебра из упорных руд: В 2-х томах (Т.1. – 342 с. – Т2. – 452 с.). – Иркутск: ОАО «Иргиредмет», 1999.

27. *Извлечение* ионов металлов биомассой микроорганизмов и сорбционной флотацией /П.М.Соложенкин, В.П. Небера, А.И. Зоубоулис, К.И. Матис //Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2003. -№ 1. – С. 89-98.

Коротко об авторах

Аренс Виктор Жанович – профессор, доктор технических наук, председатель МО ГМС РАЕН.

Черняк Абрам Самуилович – профессор, доктор технических наук, ИрГТУ.

© В.Н.Аллилуев, 2006

УДК 622.272

В.Н. Аллилуев

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ

ГЛУБОКОЗАЛЕГАЮЩИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ БОГАТЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ РУД ПРИ СОЗДАНИИ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО МОДУЛЯ ДЛЯ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ РУДНОГО МАССИВА

Семинар № 18

Геомеханическое обоснование освоения глубокозалегающих месторождений богатых железных руд (БЖР) КМА методами численного моделирования позволяет решать задачи по выбору системы разработки и определению оптимальных параметров ее конструктивных элементов еще на стадии проектирования. При предс-тавлении исходных данных о свойствах и напряженном состоянии элементов системы разработки, а также при оценке их прочности возрастает роль учета геологического строения. Структурные особенности и изменчивость условий залегания рудных тел и вмещающих пород воспроизвести для расчета напряженно-деформирован-ного состояния (НДС) массива горных пород достаточно сложно.

Типизация месторождений по структурным особенностям имеет большое значение для совершенствования систем разработки, определения параметров конструктивных элементов с учетом НДС, построения идентичных расчетных схем.

Стратиграфический комплекс массива горных пород месторождений БЖР КМА имеет общие характерные признаки.

Поверхностный рельеф изрезан оврагами, балками, разность отметок составляет около 50м. Кровля рудных залежей представлена осадочной покрывающей толщей горных пород с горизонтально залегающими пластами мелов, песков, мергеля, глин. Непосредственная кровля – известняки, которые в некоторых местах расчленены прослойками глинистых отложений. Рудный массив неоднородный как по литологическим типам, так и по прочностным показателям. Неоднородность проявляется через пространственную изменчивость физических свойств и вещественного состава БЖР. Боковые породы – сланцы, железистые кварциты. Почва – материнские железистые кварциты.

Краткая характеристика параметров залегания наиболее перспективных для промышленного освоения месторождений БЖР КМА приведена в таблице, данные для которой систематизированы из [1, 2].

Для месторождений БЖР общими являются большая глубина залегания от поверхности, значительная до нескольких сотен метров вертикальная и горизонтальная мощности рудных залежей, перекрытие рудных тел мощной толщей осадочных пород, а также обводненность надрудной толщи и рудного массива напорными водами.

Из данных таблицы следует, что глубина залегания кровли рудных залежей от поверхности изменяется в пределах 390-736 м, вертикальная мощность рудных тел 50-425 м, глубина залегания по почве достигает более 870 м.

Параметры залегания месторождений БЖР

Наименование месторождения	Глубина залегания кровли, м	Мощность рудных тел, м	Максимальна глубина (по почве), м	Мощность известняков, м	Угол падения рудных тел, град.
Шемраевское	390-440	425	870	20-85	40-50 Н
Больше-Троицкое	470	200	670	50-100	50-60 Н
Гостищевское	430-480	240-420	870	0-35	70-85 К
Яковлевское	500	200 (300)	800	25-35	60-70 К
Висловское	565	185	760	130	30-40 Н
Мелихово-Шебекинское	565-685	60-120	785	90-150	40-50 Н
Олимпийское	655-736	60-180	876	100-130	40 Н
Разуменское	610-692	50-110	806	40-100	30-40 Н

Примечание: Н – наклонное падение; К – крутое падение.

По углам падения рудные тела наклонного и крутого залегания.

Возможность систематизации геологических условий посредством выражения их через характерные структурные элементы показана в работе [3]. С этой целью выявляются характерные структурные элементы массива горных пород и соотношения свойств контактирующих структурных элементов в зависимости от модуля упругости и коэффициента Пуассона.

Упрощенные структуры строения месторождений БЖР КМА приведены на рис. 1.

Основными признаками структурно-геологического строения глубокозалегающих железорудных месторождений КМА являются ориентация структурных элементов в пространстве и форма локализации богатых железных руд. По этому признаку можно выделить линейно-пластовые рудные тела типа А (а - Яковлевское, б - Висловское, в - Олимпийское, г – Мелихово-Шебекинское, рис. 1) и синклинальные мульдообразной формы рудные тела типа Б (д – Шемраевское, у – Гостищевское, ж – Больше-Троицкое, з – Разуменское, рис. 1). Пространственное положение рудных залежей отличает несогласное залегание рудных тел относительно напластования налегающей толщи горных пород. Рудные тела большей мощности сосредоточены в центральных частях месторождений. Структуры с пологим залеганием БЖР характеризуются, как правило, малой мощностью богатых руд, а затухание процессов рудообразования наблюдается на периферии. Существенную роль в процессах рудообразования имеет крутизна падения, наиболее мощные рудные залежи обладают крутыми углами падения и близкими к ним (Яковлевское и Гостищевское, а также Шемраевское и Больше-Троицкое месторождения) [3].

БЖР с большой мощностью имеют более высокое содержание железа, чем на участках с малой мощностью. Наиболее высокие содержания железа (более 60 %) отмечаются в мартитовых, железнослюдковых и железнослюдково-мартитовых рудах. В рудах мартито-гидрогематитового состава содержание железа всегда значительно ниже.

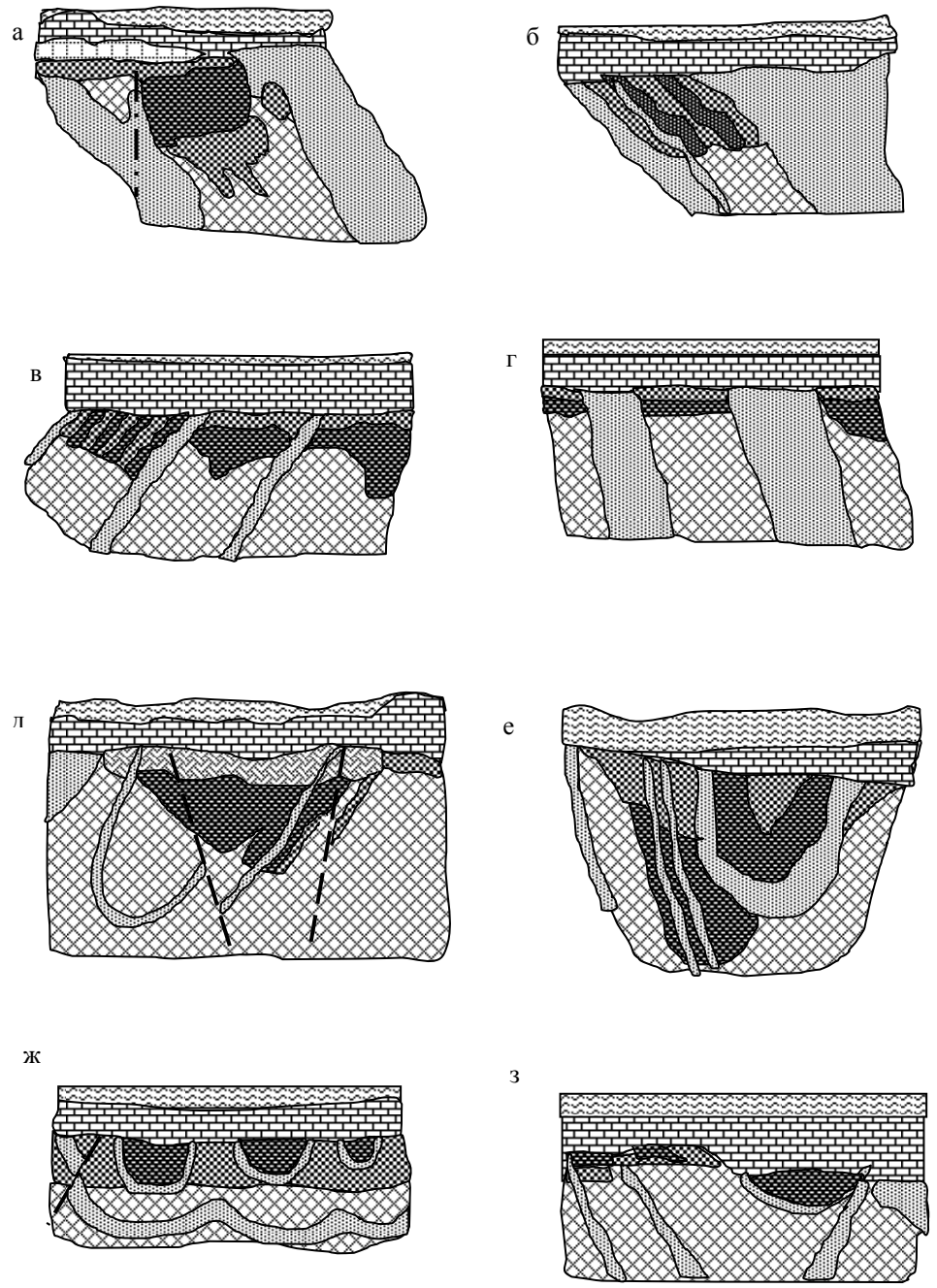
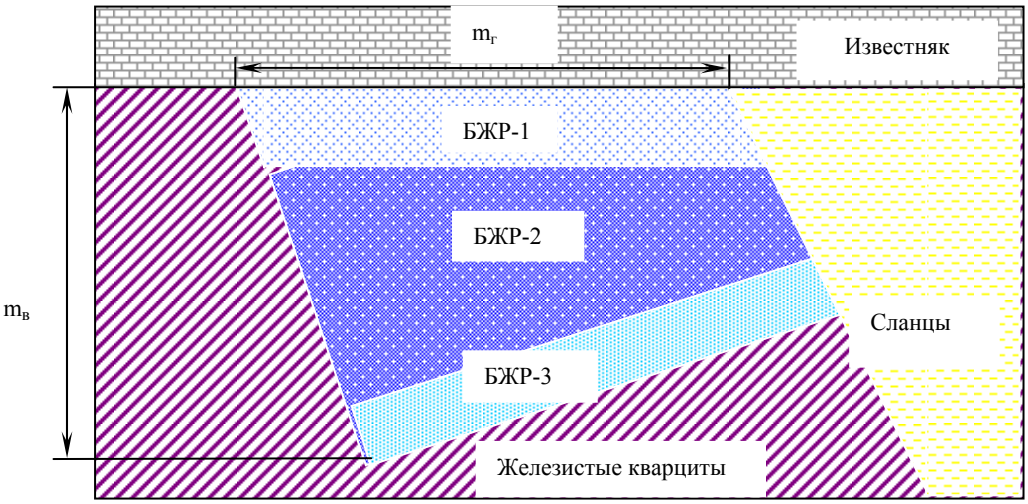


Рис. 1. Упрощенные структуры месторождений БЖР КМА



$m_г$ - горизонтальная мощность рудной залежи; $m_в$ – вертикальная мощность.

Рис. 2. Расчетная схема структурно-геологического модуля месторождения БЖР типа А

В качестве показателя степени концентрации железа служит отношение Fe : SiO_2, в богатых рудах оно колеблется от 6 до 12. Характерно также распределение содержания железа по вертикали рудных залежей, которое показывает отчетливо выраженное возрастание его к средним частям рудных залежей. К почве залежей содержание железа обычно падает, фиксируя переход богатых руд в железистые кварциты [2]. Сложные контакты рудного тела и вмещающих пород – останцы в кварцитах характеризуют границу перехода БЖР к железистым кварцитам.

На месторождениях имеющих большую вертикальную мощность в центральной части вертикальных разрезов имеются участки слабосвязанных, рыхлых железных руд с $\sigma_{сж}$< 3МПа, к ним примыкают участки с прочностью 3-5 МПа и более прочные > 5 МПа. Вертикальная зональность рудного массива по содержанию железа и по прочности позволяет выделить структурные элементы БЖР – 1, 2, 3 с различными характеристиками: модулем упругости, коэффициентом Пуассона, пористостью и другими.

Расчетные схемы в задачах предварительной оценки напряженного состояния массива могут быть основаны на усредненных свойствах слагающих структурных элементов, т.е. идеализированы. На рис. 2 и 3 представлены расчетные схемы структурно-геологического модуля месторождений БЖР типа А и типа Б)*. При этом рельеф земной поверхности и строение надрудной осадочной толщи в структурно-геологических модулях не учитываются, поскольку главным требованием безопасности разработки является сохранность от разрушения известняков. Ис-

)* – приведенные расчетные схемы структурно-геологического модуля разработаны в рамках госконтракта № 41.007.1.1.27 с Минпромнауки и технологий РФ.

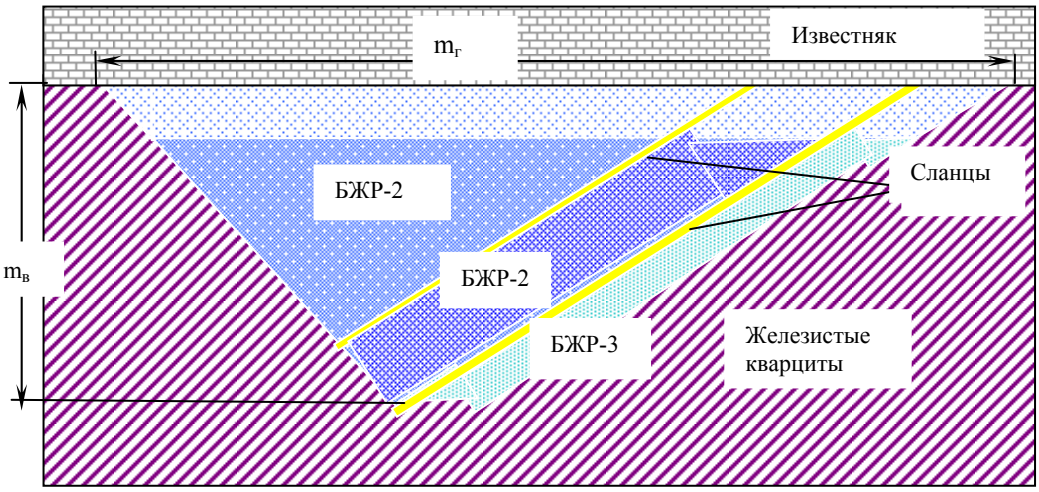


Рис. 3. Расчетная схема структурно-геологического модуля месторождения БЖР типа Б

следования показали, что при создании структурно-геологического модуля степень соответствия реальному строению и точность проведенных на этой основе расчетов НДС зависит от геометрических параметров структурных элементов, месторождения в целом и учитывается размерами конечно-элементной сетки.

В качестве примера на рис.4 приведены структурно-геологический модуль месторождения БЖР типа Б (рис. 4, *а*) и наложенные на него результаты расчета естественного напряженного состояния с динниковским распределением напряжений (рис. 4, *б*), на котором показаны зоны сжатия и растяжения. Из рис. видно, что рудный массив находится в области сжатия, которая захватывает часть известняка, область растяжения наблюдается в углах известняка и прослеживается на контакте БЖР 2 и БЖР 3. Картина естественного напряженного состояния, приведенная на рис. 5 при более детальной структурно-геологической схеме, существенно не

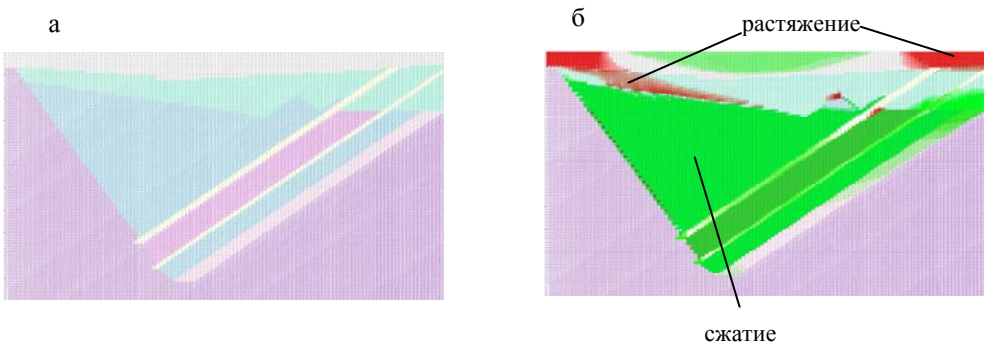


Рис. 4. Структурно-геологический (а) и геомеханический модули (б) месторождения БЖР типа Б

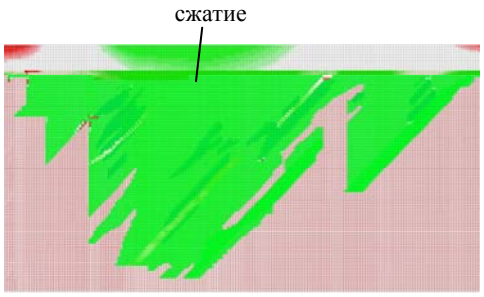


Рис. 5. Естественное напряженное состояние при более детальной структурно-геологической схеме

меняя, уточняет закономерности распределения напряжений, позволяет полнее и детальнее оценить напряженное состояние массива горных пород, а также произвести выбор оптимальных параметров систем разработки.

Таким образом, геомеханическое обоснование освоения рудных месторождений методами численного моделирования с учетом структурных особенностей и изменчивости залегания рудных тел повышает точность оценки напряженно-деформирован-ного состояния при определении параметров конструктивных элементов систем разработки. Предложенная типизация месторождений БЖР КМА по структурным особенностям дает возможность пользоваться результатами исследований НДС для обоснования систем разработки неосвоенных месторождений на стадии разработки ТЭО. Изложенный подход был реализован при создании и обосновании параметров конструктивных элементов новой технологии для освоения глубокозалегающих место-рождений БЖР КМА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Железные* руды КМА /под ред. В.П. Орлова, И.А. Шевырева, А.А. Соколова/. – М.: ЗАО «Геоинформмаркет», 2001. – 616 с.

2. *Геология,* гидрогеология и железные руды бассейна Курской магнитной аномалии (КМА). Том III.Железные руды. - М.: Недра, 1969. – 319 с.

3. *Жуков В.В.* Расчет элементов систем подземной разработки по фактору прочности. – Л.: Наука, 1977. – 207 с.

Коротко об авторах

Аллилуев В.Н. – доцент, кандидат технических наук, Губкинский институт МГОУ, ООО "НИИКМА-Гидроруда".

© А.В. Рашкин, П.Б. Авдеев, И.А. Яшкин, Ю.Н. Резник, Л.В. Шумилова, 2006

УДК 622.277

А.В. Рашкин, П.Б. Авдеев, И.А. Яшкин,
Ю.Н. Резник, Л.В. Шумилова

УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИМИ И ГИДРО-ДИНАМИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ В РУДНОМ ШТАБЕЛЕ ПРИ КУЧНОМ ВЫЩЕЛАЧИВАНИИ МЕТАЛЛОВ

Семинар № 18

Применение прогрессивной технологии кучного выщелачивания (КВ) позволяет вовлекать в промышленное производство бедные руды с низким содержанием полезных компонентов, рентабельно эксплуатировать небольшие по запасам и размерам рудные месторождения, расположенные в отдаленных районах. Она отличается относительной простотой, высокой производительностью процесса, низкими капитальными и эксплуатационными затратами. Широкое распространение кучное выщелачивание получило в медной, урановой и в золотодобывающей отраслях промышленности.

Опыт эксплуатации золоторудных месторождений Забайкалья с применением прогрессивной технологии КВ указывает на недостаточную эффективность применяемых типовых проектных решений. Первая опытно-промышленная установка КВ рудного золота в Забайкалье введена в эксплуатацию в 1996-1997 гг. на Козловском месторождении Приаргунским производственном горно-хими-ческим объединением (ОАО «ППГХО») на штабеле руды объемом 11,5 тыс.т. с содержанием золота 4,5 г/т. Зачетное извлечение золота должно было составить 85,1 %. Постепенное снижение содержания золота в продуктивных растворах, а затем резкое падение его с 1,5–1,6 мг/л до 0,2…0,3 мг/л потребовало интенсифицировать процесс КВ взрывным способом. Рыхление руды взрывом повысило интенсивность выщелачивания, но вместе с тем общее извлечение оказалось весьма низким - 12,9 %, т.е. меньше проектного в пять раз [1].

По проекту ОАО «Сибгипрозолото» согласно технологического регламента ОАО «Иргиредмет» на месторождении Дельмачик показатели извлечения золота должны были составить 69 %, но за период 2000-2003 гг. итоговое извлечение составило 54,7 % [1, 2]. В настоящее время работы на данном месторождении приостановлены из-за финансовых трудностей.

Относительно невысокое извлечение обусловлено заиливанием шламисто-глинистыми частицами рудного штабеля вследствие кольматации порового пространства нижней части штабеля суффозией мелких частиц из верхней его части в нижнюю. В проектах на разработку месторождений с применением технологии КВ не учитываются в должной степени суровые климатические условия Восточного Забайкалья: повсеместное распространение многолетней мерзлоты; низкие зимние температуры (абсолютный минимум температуры достигает -52 °С); незначительная высота снежного покрова – 6–15 см; глубокое зимнее промерзание – до 3–4 м. Эти условия снижают интенсивность КВ и содействуют развитию нежелательных

геотехнологических процессов – морозобойного растрескивания, промерзания и пучения глинистого основания кучи и противофильтрационных экранов из пленки.

В настоящее время в России и странах СНГ накоплен определенный опыт по технологии КВ и предложено множество решений повышения ее эффективности и экологической безо-пасности. Обобщение и систематизация этих решений по объектам, процессам, условиям применения и техническим приемам представляется актуальным для выбора наиболее эффективных и экологически безопасных в конкретных природно-климати-ческих и горно-геологических условиях месторождения.

Основными объектами технических решений являются рудный штабель, противофильтрационное основание (ПФО), технологические растворы и рудоподготовка. Для интенсификации КВ с целью ускорения процесса выщелачивания, увеличения продолжительности сезона извлечения металла из руды при низких температурах наружного воздуха, а также из руд с повышенным содержанием глинистых и шламистых частиц предложены способы, основанные преимущественно на управлении теплофизическими и гидродинамическими процессами в рудном штабеле:

- увлажнение штабеля песчано-глинистых пород, промерзание его с последующим удалением снежного покрова для создания морозобойных трещин в штабеле [3];

- размещение руды по периметру ПФО высотой до 2,5 м, создание промерзшей корки с последующим ее рыхлением, перемещением мерзлых кусков на ПФО, после укладки штабеля в него подают реагенты повышенной концентрации и температуры [4];

- увлажнение до полной влагоемкости, теплоизоляция снегом, ускорение оттаивания весной [5];

- удаление на площадке рудного штабеля талого грунта, формирование в мерзлом грунте чашеобразного углубления для откачки продуктивного раствора с последующим формированием над ним рудного штабеля [6];

- формирование штабеля из мерзлых руд, введение в поровое пространство горючей жидкости с последующим сжиганием для оттаивания [7];

- насыщение рудного штабеля растворами солей металлов с низкой температурой замерзания [8];

- покрытие оросительной системы и рудного штабеля светопрозрачной пленкой [9];

- послойное фракционирование руды, разделение наклонных слоев перфорированными синтетическими материалами [9];

- периодическое рыхление штабеля КВ взрывным способом [10];

- заложение в штабель руды саморазогревающихся пород, аэрация штабеля техническим воздухом [11].

Для этих же целей предложены технические решения по технологическим растворам, а также по управлению физико-химическими процессами:

- подогрев технологических растворов в зумпфе специальными погружными горелками и подача их в рудный штабель (США) [11];

- подача в выделенные участки переуплотненной рудной массы газооб-

разного выщелачивающего раствора (в виде пара) и хладоносителя [11];

- насыщение технологических растворов кислородом;

- способы и устройства подачи раствора на поверхность рудного штабеля разбрызгиванием, капельным и прудковым орошением;

- разработка нетоксичных выщелачивающих растворов (на основе иодидов, бромидов, тиомочевины и др.).

Для повышения надежности ПФО применяют различные способы и устройства, в основном это экраны из глин и полимерных пленок. В экстремальных условиях эксплуатации (морозное пучение, сейсмичность, рыхление штабеля взрывными работами и др.) целесообразно применять высоконадежные конструкции ПФО из геотекстильных материалов с использованием автогерметиков [9].

Для снижения отрицательного эффекта кольматации при выщелачивании глинистых и шламистых золотосодержащих руд и повышения реакционной способности цианидов в упорных скальных рудах применяют специальные способы рудоподготовки:

- окомкование руды цементацией;

- обработка руды до укладки в штабель высококонцентрированными растворами цианидов [12];

- добавление в выщелачивающий раствор поверхностно-активных веществ (ПАВ) для подавления сорбции при выщелачивании углесодержащих руд или руд с повышенным содержанием природных сорбентов [13].

Большое разнообразие применяемых и предложенных способов вызывает необходимость их классификации с целью сравнительного анализа и выбора наиболее эффективного и экологически безопасного технического решения. Материалы патентно-информационных исследований и анализ известных технических решений позволяют предложить классификацию способов управления гидродинамическими, теплофизическими и физико-химическими процессами кучного выщелачивания руд (таблица).

Для успешного решения проблемы интенсификации технологии КВ и повышения ее экологической безопасности необходимо выявить закономерности распределения градиентов температур, напоров и концентраций реагентов в рудном штабеле. Это может быть достигнуто путем совместного решения соответствующих уравнений математической физики в частных производных, натурных наблюдений и физического моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Опыт* освоения технологии кучного выщелачивания руд на горных предприятиях Забайкалья / Резник Ю.Н. [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2004. - № 6. - С. 284-290.

2. *Опыт к*учного выщелачивания золота на месторождении Дельмачик / Фазлуллин М.И. [и др.] // Цветные металлы. - 2002. - № 8. - С.41-45.

3. Пат. № 2188937 Российская Федерация, МПК 7Е 21В43/28. Способ кучного выщелачивания металлов из песчано-глинистых пород при отрицательной температуре окружающей среды / Якупов В. С., Якупов М. В., Якупов С. В.; заявитель и патентообладатель Институт горного дела Севера СО РАН; заявл. 26.02.01; опубл. 10.12.02, Бюл. № 25.

4. *Пат.* № 2186964 Российская Федерация, МПК 7Е 21В43/28. Способ кучного выщелачивания металлов из труднопроницаемых высокоглинистых пород / Якупов В.С., Якупов С.В., Якупов М.В., Васильев П.Н., заявитель и патентообладатель Институт горного дела Севера

СО РАН; заявл. 29.06.00; опубл. 10.08.02, Бюл. № 22.

5. *Пат.* № 2186207 Российская Федерация, МПК 7Е 21В43/28. Способ кучного выщелачивания металлов / Якупов М. В., Якупов С. В., Васильев П. Н., заявитель и патентообладатель Институт горного дела Севера СО РАН; опубл. 20.06.02, Бюл. № 17.

6. *Пат.* № 2183743 Российская Федерация, МПК 7Е 21В43/28. Способ кучного выщелачивания металлов в условиях многолетней мерзлоты / Васильев П.Н., Якупов В.С., Зубков В.П.; заявитель и патентообладатель Институт горного дела Севера СО РАН; заявл. 29.06.00; опубл. 20.06.02, Бюл. № 17.

7. *Пат.* № 2233977 Российская Федерация, МПК 7Е 21В43/28. Способ кучного выщелачивания металлов вмерзлых пород в любое время года / Якупов В. С., Якупов М. В., Якупов С. В., Васильев П. Н.; заявитель и патентообладатель Институт космофизических исследований и аэрономии СО РАН; заявл. 25.09.02; Бюл. № 22.

8. *Пат.* № 2235872 Российская Федерация, МПК 7Е 21В43/28. Способ кучного выщелачивания металлов в условиях многолетней мерзлоты / Якупов В.С., Якупов М.В., Якупов С.В., Васильев П.Н.; заявитель и патентообладатель Институт космофизических исследований и аэрономии СО РАН; заявл. 05.09.02; Бюл. №25.

9. *Рашкин А.В.* Рациональное формирование рудного штабеля при кучном выщелачивании руд / Рашкин А.В., Авдеев П.Б., Яшкин И.А. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2005. - № 11. - С. 252-254.

10. *Применение* технологии кучного выщелачивания на бедных золоторудных месторождениях Читинской области / Мязин В.П. [и др.] - Чита: ЧитГТУ, 1999. - 106 с.

11. *Воробьев А.Е.* Классификация методов выщелачивания золота при отрицательных температурах окружающей среды / Воробьев А.Е., Погодин М.Л., Чекушина Т.В. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 1999. - № 2. - С. 76-81.

12. *Казанов Е.В.* Интенсификация кучного выщелачивания золота на основе цианидной подготовки свежедробленой руды (на примере Дельмачикского месторождения): автореф. дис.: к-та техн. наук / Е.В. Казанов; Читинский государственный университет. – Чита, 2005. – 21 с.

13. *Толстов Е.А.* Физико-химические геотехнологии освоения месторождений урана и золота в Кызылкумском регионе / Толстов Е.А. – М.: изд-во МГГУ, 1999. – 314 с.

Коротко об авторах

Рашкин А.В. – доктор технических наук, профессор,
Резник Ю.Н. - доктор технических наук, профессор,
Авдеев П.Б. – кандидат технических наук, доцент,
Шумилова Л.В. – кандидат технических наук, докторант,
Яшкин И.А. - аспирант,
Читинский государственный университет.