

Расстояния  $d_1, \dots, d_8$  от точки наилучшего решения системы (3) до гиперплоскостей, заданных уравнениями баланса

	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$d_5$	$d_6$	$d_7$	$d_8$
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,012	-0,135	<u>0,351</u>	-0,091	-0,117	-0,132	-0,131	0,191
CaO	0,279	0,109	-0,037	-0,153	-0,218	-0,215	-0,242	0,481
MgO	-0,023	0,262	0,008	-0,124	-0,156	-0,066	-0,199	<u>0,334</u>
SiO <sub>2</sub>	<u>1,326</u>	-1,169	0,145	-0,305	-0,234	0,563	-0,732	1,059
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<u>-1,295</u>	0,869	0,520	-0,117	-0,047	0,396	-0,184	-0,024

Таким образом, предложенный выше метод наименьших квадратов для решения обратной задачи расчёта баланса компонентов в горных породах и рудах можно считать сопоставимым по эффективности с методом последовательных приближений. Но метод наименьших квадратов требует меньших вычислений, что является существенным преимуществом.

### Заключение

Удивительно, насколько нетривиальной и ранее не изученной оказалась обратная задача расчёта баланса – нахождение концентраций элементов в минералах по их концентрациям, а также по массовым долям минералов, в породах и рудах. Не все теоретические аспекты задачи изучены, не говоря уже о методических приёмах определения исходных величин. Наиболее интересными представляются разложение суммарной погрешности на составляющие, обусловленные различными факторами, и разработка методических приёмов их минимизации. Это – лишь одно из направлений дальнейших исследований, определившееся в дискуссиях автора с Викторией Михайловной Изойтко.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Изойтко В.М.* Технологическая минералогия и оценка руд. СПб.: Наука, 1997. – 582 с.
2. *Формы нахождения и баланс благородных металлов в рудах Фёдорово-Панской интрузии (Кольский п-ов) / Н.Л. Балабонин, В.В. Субботин, В.И. Скиба и др. // Обогащение руд. 1998. № 6. – С. 24-30.*
3. *Войтеховский Ю.Л., Скиба В.И.* Баланс благородных металлов в рудах Фёдорово-Панской интрузии (Кольский п-ов) // Обогащение руд. 2001. № 6. – С. 11-13.
4. *Войтеховский Ю.Л., Скиба В.И.* Баланс элементов в горных породах и рудах. Решение обратной задачи для искусственных смесей природных минералов // Обогащение руд. 2002. № 3. – С. 27-29.
5. *Войтеховский Ю.Л., Скиба В.И.* Баланс элементов в горных породах и рудах. Решение обратной задачи методом наименьших квадратов // Обогащение руд. 2003. № 1. – С. 25-27.
6. *Скиба В.И., Войтеховский Ю.Л., Гавриленко Б.В.* Баланс элементов в горных породах и рудах. Распределение благородных металлов в хромитовых рудах Сопчеозёрского месторождения (Кольский п-ов) // Обогащение руд. 2004. № 4. – С. 31-34.

## ОСОБЕННОСТИ МИНЕРАЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ РУД ХИМИКО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

*Петрова Н.В., Ожогина Е.Г., Рогожин А.А.*

ФГУП ВИМС, г Москва; e-mail vims-ozhogina@mail.ru

Современное состояние минерально-сырьевой базы России, в первую очередь, по металлургическим видам сырья определяет необходимость создания эффективных технологий переработки полезных ископаемых, позволяющих максимально полно извлекать все промышленно ценные минералы. Как показывает практика технологического опробования сырьевых объектов, главными моментами являются:

- 1) выявление возможности обогащения руд применяемыми в промышленности способами или необходимость поиска новых технологий;
- 2) разработка принципиальной схемы и режимов обогащения с установлением возможности получения тех или иных концентратов с прогнозными данными по качеству и извлечению основных полезных компонентов.

Наряду с показателями, характеризующими обогатимость руд, конечные показатели, определяющие ценность руды по выходу, качеству и номенклатуре товарной продукции, устанавливаются на этапе химико-металлургической переработки продуктов обогащения. В первую очередь это относится к неподдающимся обогащению и труднообогатимым рудам, когда обогащение не приводит к получению кондиционных концентратов либо сопровождается большими потерями ценных компонентов. В этом случае технологическое опробование проводят или непосредственно химико-металлургическими методами, или комплексом механических и химико-металлургических, а в последнее время и биологических методов переработки минерального сырья.

Как показывает опыт, для извлечения ценных компонентов из рудного сырья наиболее перспективны комбинированные технологии. Комплексование механического (радиометрическая сепарация, гравитация, флотация), химического обогащения руд (кислотное, щелочное, солевое, биохимическое выщелачивание, обжиг), гидро- и пирометаллургических процессов позволяет организовать законченный цикл обработки руды сложного минерального состава с получением конечной товарной продукции (металлов или их соединений) при высоком извлечении.

Создание эффективных технологических схем и совершенствование используемых в схемах процессов практически невозможно без предварительного достаточно глубокого изучения вещественного состава и установления всей суммы минералого-технологических свойств рудного сырья. Немаловажная роль в решении этих проблем принадлежит технологической минералогии, которая позволяет оценивать технологические свойства руд и продуктов их обогащения, что в свою очередь дает возможность эффективно и научно обоснованно решать задачи создания рациональных схем, предусматривающих наиболее полную и комплексную переработку рудного сырья. Многообразие типов руд черных, цветных и тугоплавких металлов, низкие содержания ценных компонентов, сложность минерального состава, комплексность требуют применения нестандартных, сложных комбинированных схем переработки и специальных методов их минералого-технологического исследования с целью получения минералогических характеристик, являющихся основными критериями оценки технологических свойств сырья [1]. Не следует забывать, что для применения химико-металлургических методов необходимо выполнение ряда требований: высокой избирательности используемых реагентов, значительной скорости разложения минералов, возможности попутного извлечения большинства ценных компонентов, экологической безопасности. Направленный поиск эффективных технологий требует знания минеральных форм нахождения металлов в рудном сырье, изучения кинетики и химизма химического взаимодействия минералов, исследования влияния сопутствующих минералов, выявления катализаторов и других стимуляторов разложения минералов, а также осуществления реакций в желаемом направлении.

В течение нескольких десятилетий на ряде отечественных объектов проводились исследования по изучению процессов переработки руд черных, цветных, редких металлов и их концентратов [2,3], что позволило выработать определенную методику изучения химико-металлургического передела сырья методами технологической минералогии. Методика основана на использовании различий в кристаллохимических особенностях разделяемых минералов, определении закономерностей химического и фазового равновесий, химической кинетики, различий в характере и скоростях взаимодействия фаз в перерабатываемом сырье. Исследования включают, помимо определения исходного минерального и элементного состава концентрата, изучение технологических свойств минералов и поведения их в технологическом процессе, а также изучение влияния порообразующих минералов на процесс разложения рудных.

Для полного комплексного использования сырья при разработке технологических гидро- и пирометаллургических схем, прежде всего, необходимы данные о минеральном составе исходного сырья и продуктов его химико-металлургической переработки с диагностикой всех минеральных фаз, количественной оценкой их содержания, форм нахождения в исследуемом продукте полезного компонента (образование им собственной минеральной фазы или соединения, изоморфное вхождение в состав другой фазы). Именно эти данные позволяют прогнозировать выбор технологии извлечения полезного (или нескольких) компонентов, а также технологические показатели переработки руд.

Исследование особенностей состава минерального сырья проводится традиционным для ВИМСа комплексом минералого-аналитических методов (оптическая и электронная микроскопия, рентгенография, магнитометрия, ИК- и ЯГР-спектроскопия, термический и элементный анализы). Главными факторами, определяющими выбор комплекса минералогических исследований, являются особенности состава продукта и сложность технологической схемы.

На стадии поисково-оценочных работ, когда впервые возникает вопрос о качестве и промышленной ценности сырья, обычно достаточно имеющихся данных о вещественном составе руды, и лишь для новых видов минерального сырья уже на этой стадии проводятся специальные технологические исследования. В задачи технологического изучения руд входит:

- разработка принципиальной технологической схемы химико-металлургической переработки сырья до кондиционного товарного продукта;
- установление и обоснование ожидаемых показателей переработки, необходимых для предварительных расчетов ее стоимости;
- выявление локализованных на месторождении разновидностей руд, которые значительно различаются по своим технологическим свойствам и показателям переработки.

Информация о руде должна включать сведения об ее структурно-текстурных признаках (в том числе характере взаимоотношения рудных минералов с минеральной матрицей, гранулярном составе минералов), форме нахождения полезного компонента, о составе и свойствах главных минеральных фаз полезных компонентов. Также необходимы сведения о фазовом составе исходных продуктов с количественной оценкой со-

держания фаз, распределении полезных компонентов по минералам, слагающим перерабатываемый продукт руды. При этом опережающая информация о минеральном составе должна быть достаточно полной.

При химико-металлургическом опробовании проводятся:

- анализ химических превращений сырья в товарную продукцию и выбор из всех возможных технологических методов только одного метода, наиболее соответствующего заданным условиям;
- анализ работы типовых промышленных аппаратов, которые обеспечивают возможность проведения процесса по выбранному методу;
- рассмотрение аппаратурной и технологической схем с экономической и социальной точек зрения.

При этом, важное значение имеют:

1. Сложность минерального состава, заключающаяся в том, что полезный компонент сосредоточен в нескольких минералах, имеющих различные технологические свойства (растворимость в кислотах и щелочах, степень дефектности структур, характер поверхности минерала, характер сростаний с другими минералами и др.). Так, сульфидная медь представлена в концентратах халькозином, ковеллином, борнитом, халькопиритом и др., в окисленных рудах – купритом, теноритом, малахитом, хризоколлой и др.

2. Комплексность руд, обусловленная их полиминеральным составом, в частности, присутствием нескольких рудных минералов. При этом один рудный минерал может содержать два или более полезных компонента, например, W, Mo, Sn, Sc, Cu и Ni в медно-никелевых рудах и др.

3. Для большей части руд характерна тонкая вкрапленность рудных минералов, выделения которых часто составляют сотые или даже тысячные доли миллиметра, а иногда и доли микрона.

4. Низкие концентрации в рудах полезных компонентов, составляющие нередко лишь десятые, а иногда сотые и тысячные доли процента.

5. Непостоянство минерального состава по количеству и соотношению полезных фаз и соотношению их с породообразующими минералами.

Назначение всякого технологического процесса – получение определенных продуктов с максимально возможным выходом. Переработка рудного сырья химико-металлургическими методами включает операции вскрытия и последующей переработки продуктов разложения с получением целевых компонентов в виде товарной продукции. Как правило, операция вскрытия основана на глубоком разложении сырья, результатами которого является возникновение новых фаз. Процесс тем совершеннее, чем полнее сырье переводится в соединения, и чем больше различия в физико-химических свойствах фаз, которые обеспечивают возможность их разделения в последующих операциях.

Для установления схемы химико-металлургического передела продуктов простого минерального состава достаточно провести лабораторные или укрупнено лабораторные исследования. В этом случае технологические свойства продуктов обогащения и возможность их переработки оцениваются по аналогам (стандартным пробам) с известными однотипными месторождениями, и схемы и режимы для технологических исследований принимают также по аналогии с продуктами близкого состава и с учетом особенностей параметров качества исследуемых концентратов.

Следует отметить, что современные руды, особенно цветных и тугоплавких металлов и продукты их обогащения, относятся преимущественно к сложным по минеральному составу видам сырья, при минералоготехнологическом изучении которого требуется нетрадиционный подход при проведении исследований. Для них характерен ряд специфических особенностей, влияющих на их технологические свойства и на порядок определения этих свойств. Поэтому при прогнозной минералоготехнологической оценке руд нередко возникает необходимость проведения специальных исследований.

На штучном (для исходных руд) или дробленом материале определяются структурно-текстурные особенности руд, определяется гранулярный состав рудных минералов, степень измененности минералов и выбираются оптимальные параметры измельчения с целью раскрытия ценных минералов и создания большей удельной поверхности твердой фазы для повышения реакционной способности руды и скорости процессов. При этом учитывается ряд факторов:

1. Крупность материала должна быть достаточной для протекания реакции в условиях осуществления процесса в желаемом направлении с максимально возможным извлечением ценных компонентов и с приемлемой для практики скоростью.

2. Возможность протекания побочных процессов, приводящих к технологическим затруднениям, например, осаждение из раствора уже извлеченного в него компонента с блокированием пленочными покрытиями активных точек поверхности взаимодействующего с растворителем кристалла.

3. Влияние различного рода дефектов на равновесие и скорость гетерогенных процессов и связанную с этим избирательность извлечения одного или нескольких элементов, основанную на различиях в скоростях взаимодействия минеральных компонентов.

4. Загрязнение растворов избыточным количеством солей и примесей, что усложняет и удорожает дальнейшую их переработку на чистые соединения металлов.

5. Степень шламообразования и влияние этого параметра на изменение фильтрационных характеристик системы.

Эти особенности должны учитываться при оценке химической активности (реакционной способности) минералов в составе сырья, которая определяет пути, режимы и основные технологические показатели процессов его переработки.

Одной из важнейших характеристик минерального сырья является форма нахождения полезного компонента в руде и тип его связи с матрицей, предопределяющая пути извлечения ценного компонента или компонентов при технологической переработке сырья, разрешающая или запрещающая использование тех или иных методов и реагентов. При этом нужно учитывать переменный состав и структурное состояние рудных минералов и минералов-концентраторов полезных компонентов, а также одновременное нахождение полезного компонента в различной связи с минеральной матрицей и в различной минеральной форме [4].

Ход технологического процесса определяет также набор и соотношение породообразующих минералов и взаимодействие руд и слагающих их минералов с различными реагентами. Установление факторов, влияющих на изменчивость технологических свойств минералов и их реакционную способность, является основой прогнозирования технологических схем. Полная и всесторонняя информация о минеральном составе сырья и особенностях его поведения в технологических процессах, по существу предопределяет технологию извлечения полезного компонента [5].

Реакционная способность системы минеральное сырье – реагент характеризуется скоростью и глубиной протекания процесса. Направление и глубина процесса определяются законами термодинамики, скорость процесса – законами кинетики. Для термодинамической характеристики принимается изменение энергии Гиббса  $\Delta G$  системы (Дж/моль):

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S,$$

где:  $\Delta H$  – изменение энтальпии вещества или реакции,

$T$  – абсолютная температура, при которой протекает процесс,

$\Delta S$  – изменение энтропии вещества.

Для кинетической характеристики рассматривается константа скорости процесса  $K_V$ :

$$K = \frac{d\varepsilon}{dt} \cdot \frac{1}{V_1^{a_1} \cdot V_2^{a_2}},$$

где:  $d\varepsilon$  – степень завершенности процесса,

$dt$  – продолжительность процесса,

$V_{1,2}$  – относительные объемы вступающих во взаимодействие компонентов,

$a_{1,2}$  – экспериментальные показатели характера процесса взаимодействия.

Чем большее отрицательное значение имеет  $\Delta G$  реакции и чем большее положительное значение имеет  $K$ , тем более активно будет протекать процесс.

Сравнительный анализ предполагаемого процесса взаимодействия минеральных компонентов в соответствующих условиях с позиции термодинамики и кинетики позволяет определить целесообразность и эффективность его осуществления.

Эти задачи, решаемые на стадии поисково-оценочных работ, требуют специальных экспериментов. При этом проводят изучение технологических свойств минералов, их поведения при взаимодействии с вскрывающими реагентами устанавливают состав, области формирования и растворимость образующих соединений. Изучают влияние породообразующих на процесс разложения рудных минералов.

Совершенствование и оптимизация технологий в значительной степени зависят от изученности физико-химических характеристик систем, на основании которых осуществляется переработка рудного сырья. Первостепенное значение при этом приобретают данные, характеризующие взаимодействие рудных минералов с различными реагентами. Любой технологический процесс является многофакторной системой, в которой взаимосвязь всех участвующих в нем переменных подчиняется сложным закономерностям. Так, значительную роль при химической переработке руд и концентратов играют минералы породообразующего комплекса – их состав, количественные соотношения, поэтому необходимо иметь четкое представление о характере фазовых преобразований, претерпеваемых минералами, чтобы оценить влияние этих преобразований на технологические показатели.

Диагностика сложных многокомпонентных физико-химических систем, которыми являются концентраты, определение характера структурно-фазовых преобразований рудных минералов в сырье должны осуществляться на базе комплексирования современных физических методов анализа (методы оптической микроскопии, в том числе анализа изображений, рентгенографический, термомагнитный, ИК-спектроскопия, рентгеновская микротомография, магнитометрия и др.) [4,6].

Это позволяет методами технологической минералогии оценить избирательность и эффективность используемых реагентов, возможность протекания вторичных реакций, интерпретировать с достаточной степе-

ную достоверности химизм взаимодействия в системе минерал-реагент и рекомендовать минеральные компоненты, которые могут замедлить или ускорить эти процессы. Так, при выщелачивании халькопирита растворами серной или соляной кислот проведение процесса в восстановительных условиях с добавкой в качестве восстановителя металлического железа обеспечивает конверсию халькопирита в более легкорастворимый халькозин, что позволяет ускорить процесс выщелачивания меди и повысить ее извлечение [7].

В ряде случаев определенное негативное влияние как на гидро-, так и на пиропроцессы оказывает состав и содержание в рудном сырье алюмосиликатных породообразующих минералов (биотита, хлорита, роговой обманки, полевых шпатов и др.). Разложение их под действием кислот приводит к образованию пленок на поверхности частиц руды, замедляющих процесс извлечения полезных компонентов, как это установлено при переработке медно-порфириновых руд Каунрадского и Кальмакырского месторождений, в которых нерудные минералы составляют 95%.

Нами изменения алюмосиликатных фаз определялись оптическими и химическими методами. Тонкие фракции руды, а также пленки, образующиеся на поверхности рудных частиц, исследовались рентгенографическим, термическим и электронно-микроскопическим методами.

Одним из критериев оценки поведения рудных минералов в технологических процессах является скорость взаимодействия минералов с реагентами. Она зависит не только от особенностей структуры и состава самих рудных минералов, но и от совокупности свойств минеральных агрегатов. Так, окислительный обжиг молибденита сопровождается образованием на поверхности его частиц твердой оболочки из продукта реакции окисления  $\text{MoO}_3$ , создающей внутри диффузионное сопротивление. Скорость реакции окисления  $\text{MoS}_2$  падает и определяется структурой этой оксидной оболочки. Проведение обжига  $\text{MoS}_2$  при  $600^\circ\text{C}$  позволяет снять это затруднение. Как показали результаты исследований огарка, с применением микрорентгеноспектрального анализа, при температуре  $600^\circ\text{C}$  оболочка  $\text{MoO}_3$  имеет рыхлую структуру и не оказывает диффузионного сопротивления.

Наличие в составе флотационных молибденитовых концентратов примесей сульфидных минералов  $\text{Cu}$ ,  $\text{Fe}$ ,  $\text{Zn}$ ,  $\text{Pb}$ , кальцита и магнезита способствует протеканию вторичных реакций. Их оксиды, частично сульфаты (продукты окисления указанных сульфидов) и карбонаты в интервале температур  $500\text{--}700^\circ\text{C}$ , по данным дифференциального термического, рентгенофазового и химического анализов, активно реагируют с  $\text{MoO}_3$ , образуя молибдаты, что при последующем, обычно принятом в промышленности, аммиачном выщелачивании огарка может привести к заметным потерям молибдена. Для обеспечения высокого извлечения молибдена, учитывая состав и растворимость новообразованных фаз, целесообразно для выщелачивания использовать растворы соды, легко разлагающие молибдаты.

Вовлечение в переработку сложных и бедных руд связано не только с привлечением новых методов изучения особенностей строения и состава руд и продуктов их обогащения, но и с использованием выявленных при минералого-технологическом изучении технологических свойств минералов или их ассоциаций, которые способны повысить эффективность процессов химико-металлургического передела.

Вариации состава не только главных рудных, но и сопутствующих минералов, сложность и изменчивость минерального состава сырья приводят к нарушениям стабильности технологических процессов и значительным колебаниям технологических показателей и, как следствие этого, к снижению эффективности обработки руд месторождений. Поэтому задача глубокого и всестороннего изучения факторов, влияющих на изменчивость технологических свойств минералов, диктуется непосредственно требованиями практики, в том числе и направленного их изменения при подготовке к технологическому переделу.

Чтобы учесть особенности изменения технологических свойств минералов в динамике, в том числе и направленные на повышение степени их контрастности в технологическом режиме, следует иметь в виду, что они формируются при развитии единой геолого-техногенной системы на различных дискретных уровнях и проявляются в широком гранулометрическом спектре, как на стадии рудоподготовки, так и в различных операциях технологической схемы. Особенно при тонком измельчении (менее  $0,044$  мм) могут значительно изменяться природные характеристики фаз: морфология, гранулометрия и конституция минералов, вплоть до появления новообразованных фаз, явлений аморфизации, полиморфизма, псевдоморфоз минералов [8]. В результате создаются условия для более интенсивного протекания и других физико-химических преобразований системы минерал – среда. Это позволяет при направленном изменении свойств минералов на макро-, микро- и наноразмере воздействовать как на сам минерал, так и на среду.

Для направленного изменения свойств минералов с целью интенсификации технологических процессов используются и разрабатываются такие методы, как акустические, механические, радиационные, ультразвуковые, энергетические, механо-термоактивация и др. Так, воздействие упругих колебаний звукового и ультразвукового диапазона способствует ускорению разложения вольфрамитов примерно в 2 раза и увеличению степени вскрытия на 10%. Интенсифицируется выщелачивание меди из хвостов обогащения медно-цинковых колчеданных руд в условиях проведения процесса с наложением ультразвукового и электромагнитного полей. Энергия микроволнового СВЧ излучения находит применение в различных способах выщелачивания никеля, кобальта и марганца из руд.

Электровзрывная обработка пирротинового концентрата обеспечивает полное разложение пирротина со скоростью примерно в 1,5-2 раза быстрее, чем в принятом промышленностью процессе. Изменения химизма окисления аналогичны для механоактивированного пирротина, хотя и имеет ряд особенностей.

Процессы, происходящие в рудах при тех или других видах воздействия, зависят, как от свойств минералов, от способности их к структурно-фазовым преобразованиям, в частности, от способности их к деформации, наличия «биографических» дефектов, типа кристаллической решетки, так и от типа и интенсивности самого воздействия.

Примерами направленного изменения свойств минералов могут служить такие процессы, приводящие к новому качеству вещества, как механо- и термоактивация, обеспечивающие повышение реакционной способности трудно вскрываемого сырья, содержащего вольфрам, молибден, олово и др. путем сверхтонкого измельчения, механохимической модификации структуры минералов, термической модификации путем обжига вольфрамитом с кальцитом в присутствии минерализаторов, изменение минерального и химического составов перерабатываемого сырья (окислительный обжиг для перевода сульфидов в оксиды и сульфаты) при термоактивации и т.д. Механохимическая активация используется при автоклавно-окислительном выщелачивании медных и медно-никелевых руд при переработке гидротермальных растворов (осаждение цветных металлов механоактивированным сульфидом железа), окислении халькогенидов. Так, степень превращения халькогенидов с «рассланной» структурой и извлечение металлов резко повышается, снижаются температура и давление.

Одним из доминирующих факторов является продолжительность механического воздействия. Это открывает возможность, используя различия в механизме и скоростях структурно-фазовых преобразований минералов в рудном сырье, направленно регулировать реакционную способность минералов и реализовать условия их селективного разложения. Так, в результате механохимического выщелачивания комплексных концентратов, состоящих из тетраэдрита  $Cu_{12}Sb_3S_{13}$ , халькопирита, пирита и арсенопирита, обеспечивается практически полное избирательное извлечение сурьмы.

Изучение влияния механо- и термоактивации, а также других видов воздействия на структуры и фазовый состав руд и продуктов обогащения различного состава и установление факторов, влияющих на конечный фазовый состав методами аналитической электронной микроскопии, рентгенографии и рентгеновской микрофотографии, позволяют установить параметры, обеспечивающие как интенсификацию вскрытия, так и проведение процесса в желаемом направлении. Минералого-технологические исследования в этом направлении способствуют разработке более рациональных технологических схем и повышению технологических показателей. Особенно это касается труднообогащаемого или неподдающегося обогащению сырья сложного минерального состава.

Если для установления химико-металлургической схемы для продуктов простого минерального состава технологические свойства продуктов обогащения и возможность их переработки оценивается по аналогам с известными однотипными месторождениями, то концентраты со сложным составом и трудными условиями переработки должны исследоваться более тщательно в условиях лабораторного опробования с учетом всего комплекса работ, необходимых для проверки и уточнения схем и показателей переработки концентратов до товарной продукции. При этом должны быть получены данные о сопутствующих полезных компонентах и вредных примесях и о распределении их по промпродуктам металлургической переработки.

И следующий этап – оптимизация технологического процесса путем сопоставления со стандартной пробой по основным техническим показателям. В этом случае технологом необходима выборка данных, обладающих наибольшей информативностью, совокупность которых может позволить установить общие закономерности и определить, какими из этих закономерностей можно пренебречь из-за малого влияния их на технологический процесс и установить, какую форму в каждом конкретном случае принимают рассматриваемые зависимости. Для этих целей рекомендовано использовать моделирование процесса, которое сначала проводят на мономинеральных фракциях (или синтезированных аналогах) рудных минералов, затем на простых двух-, трехкомпонентных искусственно составленных смесях минералов, затем на более сложных, приближенных к составу концентрата с уточнением найденных режимов на реальных концентратах. Эти работы целесообразно проводить с привлечением математических методов моделирования и оптимизации химико-металлургических процессов, используя метод теоретических обобщений, в частности, теорию подобия при переходе от лабораторных исследований к инженерной практике [9].

Теория подобия при правильном критическом отношении к ней может успешно использоваться при масштабных переходах (от стадии лабораторных или укрупнено лабораторных к опытно-промышленным) при технологической оценке рудного сырья. Основой подобия является однородная линейная функциональная зависимость между двумя переменными, например, степень разложения – температура и т.п. И если для модели (изучаемое сырье) и прототипа (стандартная проба) соблюдается однородная линейная зависимость для всех независимых переменных обеих систем, то существует полное подобие, а если только для некоторых, то частичное. И, в общем, необходимо выбрать базу данных, базовую систему (температура, продолжительность, давление, концентрация реагента и т.п.), которая может дать однозначный опыт, однозначно описать состояние вещества на любой ступени технологического процесса.

Таким образом, для решения вопроса о возможности прогнозной технологической оценки либо только на основе лабораторных и укрупнено лабораторных испытаний необходимо иметь пробу, которая может рассматриваться как стандартная, отобразить, основываясь на результатах минералогических исследований сырья, базовую систему, состоящую из наиболее характерных свойств продукта (состав химический и минеральный, кинетика и т.п.) и получить максимально возможную информацию с минимальным числом этих величин в процессе проведения эксперимента, даже в условиях его нестабильности. И, наконец, оценить правомерность такого моделирования на основе представлений развиваемых методом теоретических обобщений (теория подобия).

Такой подход позволяет оценить избирательность и эффективность используемых реагентов, полноту разложения и выщелачивания, распределение полезных компонентов по продуктам передела и с достаточной степенью достоверности прогнозировать в зависимости от состава технологические показатели по выбранным в качестве аналога схемам.

При разработке схем химико-металлургического передела для сырья со сложным и непостоянным составом устанавливаются также закономерности, по которым меняются технологические показатели в зависимости от изменения минерального состава, а также от наличия в составе руд балластных и других примесных минеральных компонентов, часто вредных для последующего передела (фосфор, мышьяк, сера,  $\text{CO}_2$  и др.). Повышенные содержания таких компонентов приводят не только к увеличению расхода реагентов и снижению качества готовой продукции, но и к ухудшению эффективности процессов и резкому падению технологических показателей за счет протекания вторичных процессов. Если вредные примеси связаны с полезным минералом, разделение возможно лишь при полном разложении последних. В случае связи вредных минеральных компонентов с породообразующими минералами устанавливается возможность отделения их от ценных компонентов путем подготовки сырья с включением в технологическую схему операций, например, кислотного или щелочного выщелачивания, предшествующих химико-металлургическому переделу. Способ предварительной обработки существенно зависит от особенностей химического и минерального состава сырья и особенностей последующего металлургического передела.

Для количественной оценки полученных в исследованиях данных выполняются простые расчеты для определения выхода продуктов и извлечения ценных компонентов в товарный продукт и более сложные для нахождения величин физико-химических термодинамических характеристик процессов. Затем проводится сравнительная оценка данных, полученных при проведении опытов в различных условиях или при различных соотношениях между количествами исходных компонентов для выявления, как состав реакционной смеси повлиял на технологические показатели и качество получаемых конечных продуктов. Полученные данные позволяют устанавливаются взаимосвязи между найденными значениями определяемых величин и соответствующими характеристиками и особенностями изучаемых процессов, их природой, и по экспериментальным данным находят оптимальные условия осуществления технологического процесса.

В совокупности, экспериментальные данные и данные минералогических исследований дают обширную информацию для прогнозной оценки промышленной ценности и качества труднообогатимых и практически необогатимых руд непосредственно химико-металлургическими методами.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Чантурия В.А. Состояние и перспективы обогащения руд в России // Цветные металлы, 2002, № 2. – С.15-21.
2. Александрова И.Т., Петрова Н.В. Состояние и перспективы развития технологической минералогии в области изучения химико-металлургических процессов // Применение технологической минералогии для повышения эффективности использования минерального сырья. Сборник трудов. М., 1987. – С.33-39.
3. Ануфриева С.И., Ожогина Е.Г., Петрова Н.В., Рогожин А.А. Изменчивость и преобразование минеральных и техногенных фаз в процессах химико-металлургической переработки сырья // Труды II Ферсмановской научной сессии Кольского отделения Российского минералогического общества. Апатиты, 2005. – С.142-144.ъ
4. Сидоренко Г.А. Роль технологической минералогии в развитии сырьевой базы страны // Применение технологической минералогии для повышения эффективности использования минерального сырья. Сборник трудов. М., 1987. – С.10-16
5. Ожогина Е.Г., Юсупов Т.С. Минералогические исследования – основа априорной оценки технологических свойств природного и техногенного сырья.// Современные проблемы комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья. Материалы Международного совещания. СПб, 2005. – С.19-21.
6. Ожогина Е.Г., Рогожин А.А. Применение комплекса методов для технологической оценки руд черных и цветных металлов// Разведка и охрана недр, 2005, № 4. – С.33-36.
7. Дрейзенгер Д., Абед Н. Фундаментальные исследования выщелачивания халькопирита с использованием металлического железа. Ч.I. Кинетический анализ//Гидрометаллургия, 2002, 66, №1-3. – С.35-37.
8. Пирогов Б.И. Изучение и оценка природы технологических свойств минералов при обогащении руд различных генетических типов // Традиционные и новые направления в минералогических исследованиях. М., ИГЕМ РАН, ВИМС.2001. – С.120-122.
9. Бочкарев Г.Р., Ростовцева В.Н. Влияние ускоренных электронов на структурные и технологические свойства руд и минералов.// Доклады РАН. Сибирское отделение, 1992, № 2. – С.87-93.