© А.А. Пешков, В.И. Брагин, 2006

УДК 622

А.А. Пешков, В.И. Брагин

*ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ РАЗВИТИЕ ГОРНОЙ ОТРАСЛИ. МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И ПОИСК НОВЫХ РЕСУРСОВ**

Семинар № 12

«… узкая специализация полезна лишь как средство накопления знаний: дифференциация дисциплин была этапом, необходимым и неизбежным, который станет губительным, если затянется надолго».
Л.Н. Гумилев

Беспрецедентно высокие темпы роста потребления невоспроизводимого минерального сырья, сложившиеся за последние 50 лет, поставили под сомнение не только возможность дальнейшего роста уровня жизни, но и само существование жизни на Земле. Впервые такие опасения были высказаны в докладе Римскому клубу «Пределы роста» (1972). Авторы доклада исходили из предпосылки об ограниченности минерально-сырьевых ресурсов, а роль научно-технического прогресса видели в сокращении темпов их истощения лишь за счет развития ресурсосберегающих производств. Возможности расширения минерально-сырьевой базы за счет вовлечения в разработку месторождений с пониженным в 2-5 раз содержанием полезного компонента, при сохранении уровня рентабельности разработки, не учитывались и не рассматривались.

Однако именно такую тенденцию отражает опыт разработки месторождений полезных ископаемых. Несмотря на периодическое открытие месторождений с высоким содержанием полезных компонентов в руде, среднее содержание разрабатываемых запасов снижается во времени. С 1925 по 1971 годы среднее содержание металла в рудах снизилось: для меди от 2,1 до 0,6 %, свинца — от 2,7 до 0,6 %, цинка — от 4,6 до 4 %, олова — от 1,2 до 0,4 %. Поскольку в настоящее время такие запасы повсеместно вовлекаются в разработку, эти данные свидетельствуют о значительных изменениях, произошедших в технологиях добычи и переработки минерального сырья. До настоящего времени темпы научно-технического прогресса в мире превышали темпы ухудшения горно-геологических условий разработки. В результате удельные затраты на добычу и переработку горной массы снижались за последнее столетие со средним темпом 0,8 % в год, который в последние десятилетия упал до 0,15 % в год. С учетом экспоненциальной формы зависимости темпы снижения затрат в будущем будут продолжать замедляться, что ставит предел возможности вовлечения

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований.

в разработку более бедных руд, чем извлекаемых в настоящее время. Это уже стало причиной многочисленных серьезных заявлений о кризисе горной науки.

Технологическое развитие, особенно современное, тесно связано с накоплением и систематизацией знаний. Науке изначально присущ способ существования, в долговременной перспективе защищающий ее от стагнации – постоянное сосуществование и чередование противоположных тен-денций: специализации – выделения узких направлений, детально прорабатывающих проблемы, и интеграции – синтеза, на основе специализированных наук, интегрированных направлений, использующих и развивающих их методы и подходы на более высоком уровне общности. Технологическое развитие за обозримый период демонстрирует наиболее впечатляющие результаты именно на стыке наук.

Если руководствоваться этими предпосылками, то где же находится та пограничная область, от которой можно ожидать принципиальных изменений в технологиях минерально-сырьевого комплекса, и какие основные идеи будут определять эти изменения? Анализ опыта развития горной технологии достаточно определенно дает ответ на первый вопрос. Точки роста всегда возникают на междисциплинарных границах внутри наук о Земле и пересечении их с науками, которые на данном этапе развития общества и в ближайшем прошлом определяли наиболее быстро развивающуюся сферу деятельности общества. Что же касается основных идей, которые будут определять изменения в технологиях, то, к сожалению, однозначного ответа на этот вопрос не существует. Тот же ретроспективный анализ показывает, что в действительно кризисных ситуациях развитие всегда многовариантно, и опережающее развитие получают идеи, которые объективно не выделяются из общего ряда, иногда совершенно неожиданные. Более того, попутно с развитием магистральной идеи всегда идет, хотя и в значительно меньших масштабах, параллельное воплощение и других, рецессивных направлений. Эти идеи в дальнейшем, на следующем зигзаге развития иногда становятся доминирующими.

В течение всего исторического времени в горном деле существовали комбинированные технологии, представляющие собой продукт растворения узкой специализации переделов, переноса средств и подходов между смежными подразделениями минерально-сырьевого комплекса, заимствующие процессы и даже аппараты, первоначально предназначенные для других условий, вплоть до техногенной имитации природных геологических процессов. При переносе методов от конечных стадий минерально-сырьевого комплекса к его началу возникают горные технологии in situ, осуществляемые непосредственно в геологической среде. Длительность существования этой области свидетельствует о ее жизнеспособности, однако сама по себе она никогда не определяла генеральное направление технологического развития. Зато область комбинированных методов является сейчас едва ли не первым поставщиком новых технологий в минерально-сырьевом комплексе, поскольку по определению постоянно находится на междисциплинарных границах геотехнологии, обогащения, металлургии и геологии. Образно говоря, она является "питательной средой" для точек технологического развития, возникающих, когда дополнительно привносятся подходы из новых, быстроразвивающихся сфер знания.

Известно, что разрешение кризисов в производстве и технологии всегда связано со скачком, который обычно определяется не усовершенствованием отдельных производственных процессов, а сменой действующей парадигмы. При этом соблюдается своего рода "принцип наименьшего действия" – глубина парадигматических изменений точно соответствует глубине и масштабам кризиса. В области технологий минерально-сырьевого комплекса за последний век имел место ряд принципиальных новаций, который можно квалифицировать как смену парадигм различной степени глубины и общности.

Наиболее масштабные изменения в технологии освоения недр произошли во второй половине, и особенно в последней четверти XIX века. Все они так или иначе были связаны с магистральной линией развития горной технологии, внедрением в промышленность крупных высокопроизводительных механизмов – экскаваторов, драг, добычных комбайнов, железнодорожного транспорта и пр. Практически все последующие изменения находились в этом русле, или были тесно связаны с ним.

Например, в 50-60-е годы XX века истощение запасов богатых руд привело к принципиальным и весьма быстрым изменениям в структуре технологического комплекса. Началось масштабное освоение месторождений медно-порфировых руд и железистых кварцитов. Резко снизилась доля руд, добываемых подземным способом, одновременно увеличилась доля открытой добычи. Возросла доля руд, подвергаемых обогащению. Это сопровождалось быстрым ростом единичной производительности горного и обогатительного оборудования, мощности рудников и обогатительных фабрик. За 10-15 лет технологический облик отрасли радикально изменился. В основе всех изменений, инициированных угрозой ресурсного голода, лежало изменение технологической парадигмы. Существовавшая долгое время система приоритетов – богатая руда, минимальный объем пустых пород, обогащение руд в случае необходимости – окончательно сменилась новой – максимальные запасы, максимальная мощность оборудования, глубокое и высокопроизводительное обогащение руд. Это изменение подхода позволило реализовать все преимущества магистральной линии развития горной технологии, за счет роста уровня комплексной механизации резко снизить издержки добычи и переработки руды.

Подобное имело место также в 80-е годы XX века в золотодобыче. Кризисная ситуация первоначально была инициирована в 60-х годах ростом себестоимости золота за счет снижения качества руд текущей добычи и достоверных запасов, впоследствии она обострилась ценовыми шоками 70-х – начала 80-х годов, беспрецедентным ростом цен на золото и энергоносители. Совершенствование и промышленная апробация технологии "уголь в пульпе", а затем технологии кучного цианирования создало основу для смены технологической парадигмы. Новая система приоритетов – максимальные запасы, максимальная мощность предприятия и оборудования, кучное выщелачивание бедных руд и технология "уголь в пульпе" для рядовых руд – так же, как и в случае медно-порфировых руд и железистых кварцитов, позволила повысить степень комплексной механизации, снизить издержки и резко увеличить добычу золота.

На той же принципиальной основе происходили изменения и в области освоения других природных ресурсов, в

частности, в сельском хозяйстве. В области освоения возобновляемых природных ресурсов происходили и намного более значительные системные изменения. Наиболее крупными и глубокими можно считать, по видимому, переходы от собирательства к подсечному и, далее, к пашенному земледелию, упорядоченному севообороту, интенсивному земледелию. Причем эта эволюция совершалась не так медленно, как может показаться на первый взгляд. Еще в середине XIX века подсечное земледелие было настоящим бедствием для западных территорий США. А "зеленая революция" – широкое внедрение интенсивного земледелия – приходится на середину XX века. В XX веке принципиально изменился также подход к использованию лесов. Но в области освоения минеральных ресурсов наиболее значительные изменения происходили только в рамках магистральной линии развития, в связи с горной и металлургической техникой и технологией, в жесткой зависимости от общего технического прогресса – от ручных орудий труда к механизмам, от паровых двигателей - к электрическим. В результате эти изменения обеспечивали рост масштабов освоения недр. Что касается принципиального подхода, то он по-прежнему подобен собирательству при освоении возобновляемых ресурсов, с вытекающими из этого экономическими, экологическими и прочими последствими.

Действительно ли сейчас, в начале XXI века, сложились условия для очередного, но уже более глубокого изменения парадигмы недропользования, за рамками магистрального направления горной технологии? Предпосылками смены парадигмы, помимо стагнации в области снижения затрат на добычу и переработку минерального сырья, можно считать наметившиеся серьезные противоречия между экстенсивным характером недропользования и ужесточением требований к сохранению окружающей среды. Острота проблем, сопутствующих эксплуатации недр, не уменьшается. Вместо простой угрозы ресурсного голода, заявленной в докладе Римскому клубу, стала очевидной угроза комплексная, включающая разрушение среды обитания человека.

По-видимому, ключевой проблемой, стоящей не только перед недропользованием, но и перед производством в целом, и с которой существующая геотехнология может справляться только в режиме временных компромиссов, является экологическая. Никакая новая технологическая парадигма в области технологии добычи и переработки минерального сырья не сможет получить развития в современных условиях, если она не предложит кардинального решения вопроса взаимобезвредного сосуществования человека и природы. Речь идет не только о защите природы в процессе освоения недр, но о таком изменении технологического подхода, при котором соблюдается принцип экологической эквивалентности, как в отношении наземной биоты, так и в отношении недр. То есть, в техногенно измененных ландшафтах (в том числе в недрах), геохимические круговороты должны быть эквивалентны циклам элементов в естественных экосистемах и выполнять те же средообразующие функции.

В свете вышеизложенного, как выглядят перспективы развития горных технологий in situ, представляющих собой продукт междисциплинарного взаимодействия и, в силу этого, наиболее подходящих на роль потенциальных точек технологического роста? Несмотря на огромное количество разработок в

области подземного и кучного выщелачивания, методов механической сепарации in situ, масштабы промышленного внедрения этих технологий на настоящий момент скромные. Наиболее значительная промышленная реализация имеет место в двух случаях: когда традиционная горная технология оказывается совершенно неприемлемой по экономическим соображениям (внедрение подземного выщелачивания гидрогенных месторождений урана); и когда технология in situ позволяет снять существенные ограничения на реализацию всех положительных свойств сопряженной с ней традиционной горной технологии. Этому варианту взаимодействия технологии in situ и горной технологии обязано широкое развитие кучного выщелачивания руд золота и меди. Относительно медленный процесс кучного выщелачивания, сам по себе более затратный, чем механическое обогащение, позволяет исключить из технологической цепочки энергоемкие и низкопроизводительные операции измельчения, отказаться от строительства дорогостоящих крупных фабрик, до максимума увеличить единичную производительность добычного оборудования и рудника в целом. Все эти факторы в сумме дают возможность с выгодой разрабатывать весьма бедные руды.

Можно сделать вывод, что на сегодняшний день технологии in situ не смогли изменить подход к освоению недр настолько радикально и эффективно, чтобы превысить выгоды использования хорошо освоенной и развитой традиционной технологии, основанной на комплексной механизации. Технологические преимущества, предоставляемые технологиями in situ, достаточно высоки при сопряжении с традиционной технологией, но, как правило, недостаточны для замены. С большой долей уверенности можно утверждать, что технологические преимущества любого подхода сами по себе недостаточны для замены действующей парадигмы. Для успешной конкуренции необходимо дополнительно радикальное расширение доступной ресурсной базы при одновременном принципиальном изменении взаимоотношений технологического комплекса и окружающей среды.

Проведенный анализ вопроса приводит нас к выводу, что радикальное повышение эффективности и экологической безопасности освоения ресурсов недр может быть достигнуто на основе принципиально нового подхода, который базируется на следующих отправных тезисах:

- любая форма освоения недр представляет собой техногенный процесс, включающий как непосредственное технологическое воздействие на геологическую среду, так и природные геологические процессы, инициированные техногенным вмешательством;
- техногенно инициированные геологические процессы являются главными источниками экологической опасности, сопровождающей освоение недр, и питаются потенциальными ресурсами недр, не используемыми в геотехнологии в настоящее время;
- радикальное повышение эффективности и экологической безопасности освоения недр возможно только при условии конструктивного управления техногенно инициированными геологическими процессами, придания им формы, наиболее желательной для получения технологического результата. При этом эффективность обеспечивается замещением дорогостоящих экономических ресурсов неиспользуемыми в настоящее время потенциальными ресурсами недр, а экологическая безопасность – управляемостью и уменьшением

побочных эффектов техногенно инициированных геологических процессов.

На наш взгляд, новая парадигма освоения недр, идущая на смену существующей, заключается в преобразовании недр посредством инициирования природных геологических процессов, использующих потенциальную энергию недр как движущую силу преобразования и переноса рудного вещества, с целью последующего эффективного извлечения необходимых минеральных ресурсов. Инициирование геологического процесса включает «открытие» системы, создание в выбранном участке недр неравновесного состояния, при котором потенциальная энергия недр приводит в движение гомеостатические механизмы геологической среды. Проектирование и управление процессом направлено на создание условий, при которых преобразование и дифференциация вещества недр приводят к формированию залежей, доступных при существующем уровне развития технологии и состоянии рынков, и условий, при которых установление равновесия приводит обработанный участок недр в состояние закрытой системы либо открытой системы, удовлетворяющей принципу экологической эквивалентности. Образно говоря, речь идет о формировании или «выращивании» месторождений с параметрами, позволяющими существенно снизить масштабы извлекаемой и перерабатываемой горной массы при их разработке, при сохранении естественных геохимических циклов. В отличие от существующего подхода преобразование недр осуществляется, во-первых, за счет максимального привлечения дополнительных ресурсов недр (гидрогеологического, химического, геоморфологического, термодинамического), которые традиционно не используются в современных геотехнологиях, а во-вторых, осуществляется процессами, аналогичными естественным геологическим механизмам, и завершается установлением равновесного состояния, отвечающего принципу экологической эквивалентности.

В качестве иллюстрации возможностей нового подхода служит направленное гидрохимическое преобразование техногенных объектов, содержащих сульфиды цветных металлов. Потенциальным ресурсом для реализации направленного геологического процесса здесь является химический потенциал реакции окисления сульфидов и потенциальная энергия подземных вод, определяемая их гидравлическим градиентом. Устойчивым геологическим процессом в этой среде является процесс окисления сульфидов и переосаждение цветных металлов и железа на геохимическом барьере. Инициирование аналога естественного геологического процесса заключается в корректировке потока подземных вод и направлении его на геохимический барьер, в создании условий для свободного доступа кислорода воздуха и, возможно, в первоначальном закислении участка массива или внесении необходимых бактериальных культур.

В действующих промышленных районах подобные технологии имеют значительные перспективы и как методы получения дополнительного металла, и как средства снижения экологического давления на ландшафты. В Норильском промрайоне, например, продукты окислительного разложения техногенных продуктов - хвостов обогащения медно-никелевых руд, забалансовых руд, шлаков и пр. - являются основным поставщиком загрязнений поверхностных и грунтовых вод. Интенсивность гипергенных процессов, даже в условиях арктического климата, оказалась достаточ-

ной для глубокого окисления остаточных сульфидов и перехода в раствор меди, никеля, железа, магния, формирования взвесей и коллоидов гипергенных минералов. Содержание цветных металлов в поровых растворах достигает сотен миллиграмм на литр, железа и магния – граммов на литр. Эти минерализованные воды смешиваются с поверхностным и подземным стоком. На поверхности в сухое время образуются высолы сульфатов. Таким образом, в результате деятельности комбината на площади в десятки и сотни квадратных километров непроизвольно запущен неконтролируемый и неуправляемый процесс техногенного корообразования, который питается химическим потенциалом техногенных продуктов и является одним из основных факторов экологического давления на экосистемы норильской тундры. В этих условиях оказывается рациональной технология, основанная на восстановлении гомеостатических механизмов природной среды. Этого можно достичь, в частности, организацией геохимических барьеров различного типа на направлениях подземного дренажа и поверхностного стока. Проведенными исследованиями установлена возможность практически полной очистки вод от металлов с формированием на барьере залежей техногенных руд с содержанием полезных компонентов, соответствующим богатым рудам. Таким образом, в результате реализации технологии достигается одновременно улучшение экологической обстановки в промрайоне, защита от загрязнений арктического бассейна и получение дохода от дополнительной товарной продукции. Особенно следует отметить тот факт, что фиксация загрязнений и формирование техногенных инфильтрационных и эвапоритовых образований на природных геохимических барьерах в Норильском промрайоне самопроизвольно протекает и в настоящее время, без целенаправленного участия человека. Но интенсивность этих процессов невелика, так как степень техногенного воздействия намного превосходит мощность гомеостатических механизмов арктических экосистем.

Положительные экономические и экологические эффекты использования новых технологий предопределяются использованием дополнительных ресурсов недр, не задействованных в традиционных технологических процессах. Именно вовлечение этих ресурсов в хозяйственный оборот обеспечивает природную ренту даже при освоении весьма бедных объектов. Поэтому перспективы реализации связаны прежде всего не с технологическими преимуществами, которые они могут иметь относительно традиционных методов разработки месторождений, а с возможностями расширения предложения ресурсов при одновременном снижении давления на окружающую среду. Даже при неизбежном снижении содержания полезных компонентов в запасах обеспечивается рост количества доступных минеральных ресурсов не только за счет вовлечения в разработку бедных запасов, но и рудопроявлений, которые пока не рассматриваются как месторождения. Таким образом, новый подход к освоению недр, основанный на организации и использовании направленных геологических процессов для преобразования недр к состоянию, максимально приближенному для эффективного извлечения минеральных ресурсов, снимает ограничения на пределы роста и в перспективе может разрешить или хотя бы существенно ослабить остроту экологических проблем, связанных с недропользованием.

Новый подход к освоению недр является существенно междисциплинарным, синтетическим. Даже краткий перечень направлений науки и вопросов, требующих решения, демонстрирует необходимость существенной корректировки исследований в области геотехнологии, консолидации действий специалистов различных отраслей науки о Земле.

Действительно ли мегатехнологии окажутся новой действующей парадигмой освоения недр? Давать прогнозы о путях развития науки или технологии – занятие неблагодарное и не вполне осмысленное. Для движения в должном направлении вполне достаточно представления о грядущих проблемах и существующих принципиальных возможностях, чтобы не превратить их в неразрешимые. Нам показалось уместным закончить эту статью высказыванием ученого, далекого от проблем геотехнологии или других наук о Земле, чтобы еще раз подчеркнуть: решение существенных задач всегда находилось вне отдельной специализированной науки.

> Ощущение, что мы живем в переходный период, переходит в уверенность, и само время требует лучшего понимания нашей среды обитания. Надо искать и исследовать новые ресурсы, стремиться достичь менее разрушительного сосуществования с Природой. Никому не дано предвидеть исход теперешнего переходного периода; однако не подлежит сомнению, что наука … будет играть все возрастающую роль в наших попытках достичь более глубокого понимания окружающей среды в глобальном масштабе с тем, чтобы воздействовать и преобразовывать ее.
>
> *И. Пригожин.*

Коротко об авторах

Пешков Алексей Александрович – чл.-корр. РАН, ИПКОН РАН,
Брагин Виктор Игоревич - доктор технических наук, ИХХТ СО РАН