

УДК 622.013:553.2

**ОБОСНОВАНИЕ ЗАМЕЩЕНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ  
ПОТЕНЦИАЛЬНЫМИ РЕСУРСАМИ НЕДР****Михайлов А.Г., Брагин В.И., Вашлаев И.И., Харитонова М.Ю.***Институт химии и химической технологии СО РАН, Федеральный исследовательский центр  
«Красноярский научный центр СО РАН», Красноярск, e-mail: mag@icct.ru*

Сохранение роста потребления минерального сырья возможно с привлечением прорывных технологий, основанных на преобразовании недр геологическими процессами, использующих физический и химический потенциал недр как движущую силу переноса рудного вещества. Сформулированы условия инициирования протекания заданных геологических процессов. Описаны основные процессы управления ресурсозамещения, механизм перевода полезного компонента в раствор и его осаждение на геохимическом барьере. Дана классификация направленных геологических процессов. Дополнительные неиспользуемые в традиционных геотехнологиях ресурсы делятся на две группы: потенциальные и непотенциальные. Показана роль замещения дорогостоящих экономических и трудовых ресурсов потенциальными техногенными геологическими процессами по направленному структурному и вещественному преобразованию участка недр. Радикальное повышение эффективности и экологической безопасности освоения недр возможно только при условии конструктивного управления техногенно инициированными геологическими процессами.

**Ключевые слова:** ресурсозамещение, недра, минеральные ресурсы, техногенно инициированный геологический процесс, формирование месторождений

**THE SUBSTANTIATION OF REPLACEMENT OF ECONOMIC RESOURCES  
BY POTENTIAL OF SUBSOIL RESOURCES****Mikhaylov A.G., Bragin V.I., Vashlaev I.I., Kharitonova M.Yu.***Institute of Chemistry and Chemical Technology SB RAS, Federal Research Center Krasnoyarsk Science  
Center SB RAS, Krasnoyarsk, e-mail: mag@icct.ru*

This growth in consumption of mineral raw materials may retain only attraction of advanced technologies, based on the transformation of subsurface geological processes which use physical and chemical potential of the subsoil as a driving force for the transfer of ore material. Conditions of initiation of course of the given geological processes are formulated. Basic processes of management of a resource replacement the mechanism of the translation of the useful component in solution and its deposition on a geochemical barrier are described. Classification of directional geological processes is given. The padding resources which are not used in traditional geotechnologies, are divided into two groups: potential and not potential. The role of replacement expensive economic and a manpower by potential technogenic geological processes on directional structural and real transformation of the subsoil plot is shown.

**Keywords:** resource replacement, subsoil, mineral resources, the geological process tekhnogenno initiated, formation of fields

Высокие темпы роста использования минерального сырья и постоянное снижение содержания полезных компонентов в рудах влекут за собой экспоненциальный рост объемов добычи и переработки. За последние 50 лет объем добычи увеличился почти на порядок при снижении среднего содержания металлов в руде в 3–7 раз [3, 4, 6]. Подход к освоению недр не изменился и по-прежнему аналогичен «собираательству». Предпосылками к смене подхода к освоению недр служат не столько стагнация минерально-сырьевой отрасли, сколько наметившиеся серьезные противоречия между экстенсивным характером недропользования и ужесточением требований к сохранению окружающей среды. 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. Образно говоря, речь идет о формировании или «выращивании» месторождений с условиями для существующей технологии параметрами, позволяющими существенным образом снизить масштабы извлекаемой и перерабатываемой горной массы при их разработке [3, 6].

Геологические преобразования в недрах протекают постоянно. Их направленность – равновесное состояние. Для условий «далеких» от равновесного состояния, процессы протекают с более высокой интенсивностью, в отличие от процессов в участках земной коры, где состояние является близким к равновесному. Масштаб и направление геологических процессов зависят от многих факторов, прежде всего от наличия и пространственного расположения потен-

циальных ресурсов недр, которые могут быть задействованы в этих процессах. Интенсивность направленного геологического процесса, проходящего в участке недр, близком к равновесному, по-видимому, зависит от величины, на которую можно сместить это равновесие [1]. К примеру, большая часть техногенно инициированных геологических процессов, к сожалению, не создает положительных эффектов для геологической среды и для недропользования. Наоборот, эти процессы требуют компенсации вреда, причиненного природной среде, что происходит, как правило, уже после завершения горных работ [5].

Любое вмешательство в состояние близкое к равновесному влечет за собой привнесение того или иного потенциала. Разность физических и геохимических потенциалов недр служит основой направленности и интенсивности протекания процессов. В минерально-ресурсной сфере деятельности следует обратить внимание на возможность использования геологических процессов (интенсивности и направленности) для повышения эффективности освоения. Для этого, на наш взгляд, необходимо выполнение следующих условий:

1) локализация направленного геологического процесса в заданном участке недр и во времени;

2) протекание геологического процесса в направлении повышения концентрации полезного компонента, снижения содержания вредных примесей и преобразования участка недр к виду, который наиболее приемлем для возможной последующей разработки вновь создаваемого месторождения;

3) затраты на инициирование и управление геологическим процессом не должны превышать затраты на поиск, разведку и подготовку нового месторождения аналогичного качества и масштаба традиционными способами.

Очевидно, что геологические процессы, даже при их инициировании в нужном направлении, являются трудно управляемыми. Поэтому в первую очередь следует обратить внимание на процессы, направление которых надежно прогнозируемо и которые в силу этого требуют минимального управления. Как правило, это процессы, направление которых контролируется одним или двумя факторами, к примеру гидравлическим градиентом или перепадом высот. Вариантом технологического примера могут служить схемы извлечения забалансовых запасов с использованием гидрогеологическо-

го ресурса. Так, водоотлив при разработке месторождений полезных ископаемых, необходимый для извлечения объемов горной массы и создания производственных условий в рабочей зоне, создает в недрах депрессионную воронку вокруг месторождения, ниже поверхности которой потоки подземных вод не нарушены. Наличие депрессионной воронки является одним из условий для запуска и протекания направленного геологического процесса. Следующим условием является наличие в бортах выработок некондиционных руд. Не менее важным условием объемного геологического процесса является также механизм перевода полезного компонента в раствор и последующее осаждение его на геохимическом барьере. При соблюдении вышеприведенных условий может быть запущен направленный геологический процесс посредством использования потенциала недр в форме склона гидравлического градиента депрессионной воронки. Для инициирования геологического процесса в зоне размещения забалансовых запасов руд следует разрыхлить массив (взрывным дроблением) с целью увеличения коэффициента фильтрации. Повышение коэффициента фильтрации приводит к перераспределению водных потоков с направлением их основной массы через этот участок. В область скопления забалансовых запасов подаются реагенты, инициирующие реакции окисления рудных минералов. Направленный поток подземных вод с раствором полезного компонента попадает в выработанное пространство карьера. В карьере раствор проходит через природный или техногенно созданный геохимический барьер, где полезный компонент осаждается. В данном примере используются два механизма техногенного инициирования геологического процесса: механический и физико-химический. Проведение направленного геологического процесса в таком варианте попутно с действующим производством имеет существенное преимущество, которое заключается в том, что затраты на инициирование, перераспределение водных потоков, перенос и осаждение компонентов могут быть отнесены на основное производство и при этом увеличивается сырьевая база предприятия.

Для процессов, которые могут быть организованы на поверхности, инициирование и сам процесс, по всей видимости, будут наиболее управляемыми. Примером тому может служить вариант формирования аллювиального месторождения, создаваемого, например, с использованием потен-

циала перепада высот. Для золотоносного массива коры выветривания или техногенных отвалов технологический вариант может выглядеть следующим образом. Выше массива (по уровню), который предполагается переотложить, накапливают запас воды, одновременно оформляют русловый подвод потока воды к массиву, и на начальном участке массива создают пионерный котлован с той целью, чтобы через фронтальную часть поток захватил весь участок. Запас воды за минимально короткий период выпускают по созданному руслоотводу. Используя потенциальную энергию, водный поток разрушает материал массива, взвешивает твердые частицы и уже в виде селевого потока перемещает, например, к озеру. При разрушении и перемещении происходит дезинтеграция частиц, а в водной среде озера происходит расслоение частиц по плотности и крупности. При осаждении частиц гравитационного золота с плотностью, значительно превышающей плотность вмещающих пород, может быть сформировано месторождение с содержанием золота как минимум в 3–4 раза выше среднего содержания в месторождениях, находящихся в разработке в настоящее время. Приведенный вариант направленного геологического процесса формирования аллювиального месторождения показывает, что инициирование и управление процессом на сегодняшнем уровне технологического развития и знаний о геологических механизмах может быть относительно надежным. Для процессов, протекающих в недрах, его результат может быть не столь очевидным. Это обусловлено сложностью полного учета всех условий как непосредственно в исследуемой части объема недр, так и его связей с окружающими участками.

Однако даже при неполном знании условий в преобразуемом участке недр адекватное инициирование процесса может достаточно надежно задавать его направление. Примером может служить направленный геологический процесс гидротермального окисления сульфидов. Запуск этого процесса может быть осуществлен следующим образом. В нижнюю часть сульфидного оруденения, на котором проведено предварительное разрыхление, создают высокую температуру и подают окислитель. Сульфиды начинают интенсивно окисляться, перемещая ядро процесса вверх. После полного завершения окисления будет сформировано новое рудное тело окисленных руд в приповерхностной части, где отсутствуют ус-

ловия для интенсивного протекания процесса. Неполный учет всех факторов может не привести к ожидаемому результату. Так, перемещение рудного вещества в процессе окисления сульфидов может отклониться в сторону при смене, например, направления исходного оруденения или вовсе прекратиться из-за прерывания сплошности сульфидного оруденения на пути движения ядра процесса. Масштабность направленного геологического процесса и вектор основного направления зависят от метода инициирования. Интенсивность же процесса зависит от исходного потенциала среды.

Отсутствие широкой промышленной практики инициирования направленных геологических процессов не позволяет детально классифицировать как сами процессы, так и соответствующие им методы инициирования. Тем не менее в обобщенном виде можно выделить четыре главных механизма: **механический, физико-химический, термодинамический и комбинированный.**

Концепция ресурсозамещения в геотехнологиях основана на использовании природных геологических и техногенных процессов. В своем полном масштабе она предполагает подключение дополнительных ресурсов недр к имеющимся технологическим возможностям. Дополнительные не используемые в традиционных геотехнологиях ресурсы делятся на две группы – потенциальные и непотенциальные. Потенциальные ресурсы представлены потенциальной энергией первичного, неизмененного состояния участка недр по отношению к равновесному состоянию, к которому недра приходят в результате осуществления направленного геологического процесса. Составляющие потенциальной энергии – химическая (химический потенциал сульфидов и других минералов), механическая (энергия водных потоков, напряженного состояния массива и пр.) и тепловая. Потенциальные ресурсы являются движущей силой направленного геологического процесса и в ходе его потребляются. Непотенциальные ресурсы представляют собой условия или предпосылки благоприятного протекания направленного геологического процесса и могут сохраняться после его завершения. К непотенциальным ресурсам можно отнести, например, обводненность массива горных пород, благоприятствующую гидрохимическим процессам, или наличие трещиноватости. Направленный геологический процесс, иницированный в недрах, приводится в дви-

жение потенциальными ресурсами геологической среды, осуществляется в условиях, задаваемых непотенциальными ресурсами, и, таким образом, дополнительные ресурсы недр становятся необходимым компонентом функционирования всей технологической системы. Использование дополнительных ресурсов недр в процессах активной геологии приводит к ресурсозамещению, т.е. к снижению потребления экономических ресурсов, по сравнению с вариантом освоения данного участка недр традиционными геотехнологиями.

Выделение в дополнительных ресурсах недр группы потенциальных ресурсов позволяет теоретически обосновать наиболее подходящий тип направленного геологического процесса для данного участка недр. Этот выбор осуществляется в соответствии с принципом геотехнологического продолжения рудообразования, представляющим собой необходимое условие эффективности подготовки месторождения методами активной геологии.

Предлагаемый подход к определению дополнительных ресурсов недр в рамках активной геологии позволяет наполнить это понятие корректным экономическим содержанием, определив стоимость дополнительных ресурсов как эффект от замещения экономических ресурсов. Исходя из этого, проведены оценки перспективных технологических решений в области активной геологии и определены условия их применения. В частности, установлена возможность значительного повышения эффективности освоения россыпных месторождений, в том числе низкопродуктивных золотоносных толщ при использовании гравитационных методов активной геологии. Предельно рентабельное содержание золота при коэффициенте замещения экономических ресурсов дополнительным ресурсом в форме энергии водотоков на уровне 0,7–0,8 составляет десятки миллиграммов на кубометр. Значительное влияние на эффективность методов активной геологии оказывает интенсивность или скорость подготовки участка недр, что обусловлено отдалением момента получения дохода по сравнению с освоением месторождения традиционными геотехнологиями. Для гидрохимических процессов активной геологии получены количественные оценки критической и минимально допустимой интенсивности подготовки месторождения в зависимости от качества сырья и степени ресурсозамещения. Это позволило сформулировать достаточное условие эффективно-

сти методов активной геологии: проведение процесса при интенсивности и степени ресурсозамещения больших, чем минимально допустимые.

В качестве одного из примеров можно привести метод направленного гидрохимического преобразования техногенных объектов, содержащих сульфиды цветных металлов, например хвостохранилищ обогатительных фабрик. Потенциальным ресурсом 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 окисного железа на физических или геохимических барьерах. Инициирование направленного процесса заключается в корректировке потока растворов с реагентами и направлении их на барьер, создание условий для свободного доступа реагентов и, возможно, первоначальный запуск с доступного участка. Проведенные экспериментальные исследования, к примеру, на Майнском медьсодержащем хвостохранилище (0,2% Cu) и экономические оценки показали, что за счет ресурсозамещения возможно освоение этого объекта с эффективностью, в 4 раза превышающей эффективность традиционного способа. Следует отметить, что в мировой и отечественной практике объекты такого рода считаются заведомо непригодными для освоения не только традиционными способами, но и методами физико-химической геотехнологии.

Другой пример выбора устойчивого в геологической среде направленного геологического процесса – перенос золота с подземными водами в виде комплексов с гуминовыми соединениями. Известные исследования вторичных гипергенных концентраций золота свидетельствуют о том, что при благоприятных условиях значительная часть золота в процессе образования кор выветривания переносится именно в этом виде, и, следовательно, в зоне гипергенеза этот процесс является устойчивым. Это позволяет предположить, что подземное выщелачивание золота гуминовыми растворами с переотложением металла на геохимическом барьере и формированием богатой залежи является более приемлемым, чем процессы с участием неустойчивых в недрах цианида или свободного хлора. Проведенные эксперименты продемонстрировали возможность реализации

такого процесса. Экономическая оценка показала, что при использовании потенциального ресурса недр в виде гидравлического градиента подземных вод, направленный процесс переноса золота в виде гуминовых комплексов является высокоэффективным.

Наиболее ярким примером ресурсозамещения в процессах активной геологии, пока не реализованным на практике, является процесс гидрохимического преобразования рудных залежей направленным гидротермальным процессом (гидротермальный котел). Здесь потенциальным ресурсом является, как и при подготовке сульфидных хвостохранилищ, химический потенциал реакции окисления сульфидов. Непотенциальные ресурсы – наличие достаточной проницаемости и обводненности массива. В условиях гидротермального котла использование химического потенциала более глубоко и эффективно. При повышенных давлениях, имеющих место на глубинах залегания рудных залежей, возможен разогрев котла за счет теплоты окисления до температур выше 200°C. Направленный геологический процесс, при условии доступа кислорода в нижнюю часть массива, инициируется окислением сульфидов. Высокие скорости реакций при этих температурах приводят к формированию узкой реакционной зоны, в которой и происходит преобразование вещества массива. Выше зоны окисления формируется устойчивый эпitherмальный процесс с образованием характерных для него вторичных минеральных ассоциаций. Градиенты температур, концентраций растворов и соответствующие им градиенты плотности растворов создают циркуляцию в объеме задействованного в процессе участка недр, что обеспечивает перенос металлов на геохимические барьеры без использования дополнительного насосного оборудования. Этот набор основных факторов обеспечивает высокую степень замещения экономических ресурсов потенциальным ресурсом недр.

Таким образом, опыт известных и применяемых на практике процессов активной геологии, а также экспериментальные исследования и экономические оценки перспективных решений в этой области показывают определяющую роль замещения экономических ресурсов дополнительными потенциальными и непотенциальными ресурсами недр в формировании показателей экономической эффективности. Замещение экономических ресурсов дополнительными ресурсами недр преобразуется в структуре минерально-сырьевой базы замещением нерентабельных месторождений рентабельными. Структура

преобразованной минерально-сырьевой базы отражает распределение уже не только основного ресурса (например, металла), но и дополнительных, что существенно увеличивает ценность и эффективность освоения минерально-сырьевой базы в целом.

Таким образом, формирование новых месторождений и структурные преобразования действующих и уже отработанных позволят поднять минерально-сырьевую отрасль на новый уровень. Перераспределение месторождений в сторону увеличения доли доступных богатых объектов радикально изменит порядок освоения минерально-сырьевой базы, выводя в число первоочередных именно преобразованные объекты, характеризующиеся высоким качеством даже при малых запасах руды, но существенно низкой капиталоемкостью, поскольку затраты на геотехнологическую подготовку методами активной геологии сравнимы с затратами на поиск и разведку. Возникают предпосылки для изменения акцентов в стратегии пополнения минерально-сырьевой базы, которая может выразиться в снижении доли поисковых и геологоразведочных работ на новых площадях и преимущественном развитии работ по дополнительной разведке и геотехнологической подготовке низкокачественных площадей. К сегодняшнему дню вопросы, связанные с ресурсозамещением на уровне региональной минерально-сырьевой базы, изучены крайне недостаточно. Однако, на наш взгляд, этот аспект рассматриваемой проблемы содержит в себе большие возможности для совершенствования недропользования.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности, проект РФФИ-ККФН № 16-45-242048.*

#### Список литературы

1. Брагин В.И. Методы геотехнологической подготовки гипергенных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2002. – № 4. – С. 151–153.
2. Воробьев А.Е. Новая концепция освоения минеральных ресурсов в литосфере. // Горный журнал. – 2002. – № 8. – С. 7–12.
3. Лавров Н.П., Чернегов Ю.А. Формирование прорывных направлений в горных технологиях с использованием современной методологии технического творчества // Горный журнал. – 1990. – № 12. – С. 3–12.
4. Пешков А.А., Брагин В.И., Михайлов А.Г., Мацко Н.А. Геотехнологическая подготовка месторождений полезных ископаемых. – М.: Наука, 2007. – 287 с.
5. Трубецкой К.Н., Воробьев А.Е. Классификация методов воспроизводства минерального сырья // Горный журнал. – 1998. – № 1. – С. 30–34.
6. Трубецкой К.Н., Пешков А.А., Мацко Н.А., Михайлов А.Г., Брагин В.И. Концепция подготовки месторождений к освоению // Горный вестник. – 1999. – № 2–3. – С. 11–17.