

УДК 622.272

## ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ВЫБОР ТЕХНОЛОГИЙ ОСВОЕНИЯ НЕДР, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ ПОДЗЕМНЫХ РУДНИКОВ



**Д. Р. КАПЛУНОВ,**  
проф., д-р техн. наук,  
чл.-корр. РАН



**Д. Н. РАДЧЕНКО,**  
старший научный сотрудник,  
доцент, канд. техн. наук,  
mining\_expert@mail.ru

Институт проблем комплексного освоения недр  
им. академика Н. В. Мельникова РАН, Москва, Россия

### Введение

Одним из нововведений проектирования подземных рудников в последние годы является учет рисков и последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, связанных со строительством, производственной деятельностью, реконструкцией и ликвидацией горных предприятий. В то же время, судя по темпам развития искусственных интеллектуальных систем, типовые проектные задачи скоро будут решаться на базе ситуационного моделирования и предложений наиболее оптимальных вариантов из множества возможных, оцениваемых непрерывно в динамике функционирования горного предприятия с адаптацией к изменяющимся условиям. Ведется реализация перспективных инноваций, среди которых роботизированное строительство и эксплуатация рудников.

К современным достижениям в области горного проектирования относится новое понимание самого предмета проектной деятельности. Если ранее основными целевыми функциями горнотехнической системы являлись сугубо экономические, то в XXI веке требований окупаемости затрат и наличия положительной динамики финансовых потоков уже недостаточно. На сегодняшний день горная промышленность не может функционировать в отрыве от принципов устойчивого развития [1–5], под которым следует понимать не только классическое определение, подразумевающее такое развитие, которое позволяет обеспечить существование общества без угрозы будущим поколениям удовлетворять свои потребности. В области горных наук, изучающих закономерности техногенного преобразования

На базе анализа мирового опыта и обобщения результатов собственных исследований авторов определены направления развития проектирования подземных рудников и рассмотрены технологические принципы устойчивого развития горных предприятий. Показаны возможности практического применения в целях устойчивого развития известных и перспективных процессов подземной разработки рудных месторождений. Раскрыто понятие нового технологического уклада, призванного обеспечить устойчивое развитие подземных рудников. На примере подземной разработки месторождений цветных и благородных металлов предложены типовые проектные решения, направленные на обеспечение устойчивости работы горных предприятий в изменяющихся горно-геологических условиях и учитывающие экономический, экологический и социальные аспекты устойчивого развития. Установлено, что достижение целей устойчивого развития возможно только на базе синхронной трансформации геотехнологий и техногенно преобразуемого участка недр. Показаны возможности повышения полноты и комплексности освоения рудных месторождений при переходе на новый технологический уклад.

**Ключевые слова:** рудные месторождения, освоение недр, устойчивое развитие, подземный рудник, геотехнология, горнотехническая система, закономерности функционирования, новый технологический уклад, проектирование.

**DOI:** 10.17580/gzh.2017.11.10

недр Земли, которые являются условием существования общества, данное определение трансформируется. Под устойчивым развитием должен пониматься комплекс стратегических инициатив, обеспечивающих эксплуатацию каждого осваиваемого участка недр неопределенно долго, путем первоначального проектирования этапов перехода от одного вида геотехнологий к другому в ходе освоения месторождений, а также на период после завершения добычи полезных ископаемых.

В России этот вопрос включен в повестку дня: цели устойчивого развития пропагандируются на государственном уровне и развиваются в крупнейших отечественных горных компаниях, имеющих коммерческий интерес по всему миру. В направлении устойчивого развития горных предприятий проводятся соответствующие исследования [6–9].

### Теоретическая часть

В соответствии с концепцией устойчивого развития, целевые функции горнотехнической системы должны оптимизиро-

ваться по требуемым технико-экономическим, экологическим и социальным критериям (рис. 1). Следует отметить, что зачатую достижение одних целей, к примеру экономических, может быть достигнуто только в ущерб другим — экологическим. Применительно к концепции устойчивого развития — это, по сути, трилемма, предполагающая многокритериальную оценку интересов недропользователя, государства и индивидуума.

В России, где на каждого жителя приходится по 12 га территории, глобальное значение устойчивого развития осознается еще не в полной мере. Вместе с тем в странах Европейского Союза, Азии с высокой плотностью населения участок недр, включающий запасы полезного ископаемого, рассматривается не просто как сырьевой, но как важный компонент среды обитания человека, который должен постоянно использоваться в различных функциональных назначениях. Таким образом, доминирующая в настоящее время экономическая составляющая недропользования в части добычи полезных ископаемых уже на начальной стадии проектирования должна рассматриваться только во взаимосвязи с экологической и социальной составляющей устойчивого развития горного производства.

Экологическая составляющая устойчивого развития представляется в:

- сохранении физической структуры участка недр и земной поверхности для поддержания своим строением, веществом и физическими полями устойчивости биосферных процессов [10];
- реализации возможностей управления миллиардами тонн промышленных и бытовых отходов, полная утилизация которых возможна только в выработанных пространствах недр;
- создании микроклиматических зон и управлении средой обитания в осваиваемом подземном пространстве в зависимости от его функционального назначения.

Социальная составляющая устойчивого развития горнотехнических систем включает:

- обеспечение общества необходимыми сырьевыми ресурсами;
- интеграцию населения в зонах урбанизации;
- обеспечение благоприятных условий труда при постоянном снижении доли ручного труда и влияния человеческого фактора при освоении недр;
- создание пространства для обеспечения потребностей общества в нессырьевых ресурсах — транспортных коммуникациях, размещении производств, глубинной урбанизации и пр.

Учет экологических и социальных аспектов устойчивого развития приводит к тому, что в странах с высокой плотностью населения вводится новое, до настоящего времени «немыслимое» понятие — 3D-стоимость земли [11], т. е. не только стоимость земельного отвода с учетом ценности земель и запасов полезного ископаемого, но и всех полезных свойств данного участка с перспективой неопределенно долгой его эксплуатации. Учитывая, что, по прогнозам ООН, население планеты увеличится к середине столетия до 10 млрд человек [12], этот факт — все возрастающей роли недр для устойчивого развития общества — не может игнорироваться.



**Рис. 1. Соотношение основных аспектов устойчивого развития в горнодобывающей отрасли**

Таким образом, для всех субъектов недропользования добыча полезных ископаемых переходит на качественно иной уровень, где различные аспекты добычи руд интегрируются в новый технологический уклад, при котором горное предприятие представляет собой инструмент для развития общества на принципах устойчивого развития. Технологический уклад горного производства должен представлять собой целостное и устойчивое образование, в рамках которого осуществляется полный цикл, начинающийся с добычи и получения первичных ресурсов и заканчивающийся выпуском набора конечных продуктов и услуг, соответствующих типу и требованиям общественного потребления [13, 14].

### Методология исследования

В свете концепции устойчивого развития ключевым фактором горного производства на современном этапе и главным технологическим нововведением, является интеграция составляющих недропользования в систему «человек — машины с элементами искусственного интеллекта — техногенно изменяемые недра». Такая по-новому понимаемая горнотехническая система должна функционировать в результате проектирования совокупности сопряженных производств, имеющих единый технический уровень и развивающихся синхронно в целях быстрой адаптации к изменяющимся условиям.

Реализация этих принципов в проектных решениях и на практике становится возможной при переходе на новый технологический уклад, базирующийся на создании «умных» геотехнологий — изменяющихся в зависимости от характера исполь-

зования и по мере трансформации недр. Применительно к подземной разработке месторождений цветных, редких и благородных металлов на период добычи полезных ископаемых такими условиями являются:

1) комбинирование физико-технических и физико-химических геотехнологий для наиболее эффективной разработки месторождений; типовые проектные решения для различных условий добычи и переработки руд разработаны и систематизированы в фундаментальной монографии [15];

2) использование перемещаемого (мобильного) оборудования, позволяющего обеспечить управление объемами и качеством минерально-сырьевых потоков с выдачей на поверхность только кондиционных руд, такого как внутрирудничные сепараторы, позволяющего уменьшить объем выдаваемой на поверхность породной рудной массы с низким содержанием ценного компонента, характеризующейся повышенным разубоживанием;

3) применение мобильных закладочных комплексов, предназначенных как для утилизации пород от проходки горных выработок и отходов внутрирудничной сепарации, так и для оперативного возведения искусственных конструкций различного назначения при создании условий многофункционального использования выработанных пространств;

4) эксплуатация оборудования с элементами искусственного интеллекта, способного работать без участия человека в особо опасных зонах подземного рудника; при этом человеческий фактор производства трансформируется в сферу обслуживания такого оборудования (дистанционное управление технологическими процессами и ремонтно-восстановительные работы);

5) создание микроклиматических зон в подземных рудниках в зависимости от факта и частоты присутствия человека с возможностью локальной подачи, отведения и управления параметрами воздушной среды;

6) создание изолированных камер для реализации физико-химических процессов извлечения ценных компонентов из некондиционных руд и техногенного сырья, вплоть до применения агрессивных и ядовитых сред для извлечения благородных металлов, исключая контакт с атмосферой рудника и пребывание людей в таких зонах;

7) разработка новых принципов организации труда в подземном руднике для обеспечения безопасности производства – установление правил и критериев работы в условиях применения мобильного роботизированного оборудования и целенаправленного изменения физических свойств участка недр в целях адаптации к изменяющимся условиям.

Анализ этих направлений, совокупность которых характеризует новый технологический уклад горного производства при подземной разработке месторождений полезных ископаемых, позволяет заключить, что цели устойчивого развития – экономические, экологические, социальные – могут быть достигнуты только за счет реального изменения набора геотехнологий и их синхронного функционирования.

Такой подход требует нового взгляда на сугубо горные вопросы – например, целесообразность применения высокопроизводительных и экономически бесспорно выгодных систем разработки с обрушением руды и вмещающих пород. На первый взгляд, такие системы не соответствуют принципам устойчивого развития, так как не обеспечивают сохранения физической структуры недр. В то же время известны исследования по созданию в недрах искусственных сооружений, «каркасов», в пределах которых возможно применение систем с подэтажным и этажным само- и принудительным обрушением [16, 17]. С другой стороны, в условиях устойчивого развития по-новому раскрываются перспективы применения систем с закладкой выработанного пространства, главным образом твердеющей и комбинированной; технологии закладки выработанного пространства обретают новый смысл и статус, по сути, строительных геотехнологий, призванных обеспечить экологическую и социальную составляющую устойчивого развития на базе заблаговременного создания подземных сооружений и несущих конструкций, используемых в различных назначениях после отработки запасов полезного ископаемого данного участка недр.

Целесообразно выделить два этапа, учет которых еще на pre-feasibility стадии проектирования и последующих позволит выявить этапы перехода с одного вида геотехнологий к другому и способы освоения участка недр в целях, не связанных с добычей полезного ископаемого. Первый этап – этап отработки балансовых запасов и по возможности некондиционных руд за счет комбинации физико-технических и физико-химических геотехнологий, методов внутрирудничной сепарации и закладки выработанного пространства. Особенности проектирования состоят в обосновании последовательности вовлечения запасов кондиционных и некондиционных руд, следовательно, графика ввода производственных мощностей, в том числе перерабатывающих. При этом требуют решения вопросы геомеханического обеспечения порядка отработки запасов в свете перспектив сочетания геотехнологий и применения внутрирудничного мобильного оборудования – обоснование фронта развития горных работ, оценка устойчивости искусственных конструкций различного назначения и т. д. Второй этап включает технологические операции, которые позволяют обеспечивать поэтапный ввод камер, выработок, коммуникационных сетей для использования формируемого пространства в целях, не связанных с добычей полезного ископаемого (склады, хранилища, лаборатории, энергетические установки, подземные паркинги и др.) [18, 19].

Учет природных особенностей участка недр, вещественного состава руд и пород, структуры и геомеханического состояния горных массивов, гидрогеологического режима подземных вод, комплексных схем формируемых минерально-сырьевых потоков, типа применяемого оборудования и логистических схем его перемещения и других факторов, динамично изменяющихся во времени по мере комплексного освоения участка недр, требует новых принципов проектирования горнотехнических систем.

По аналогии с природными явлениями, в ходе антропогенеза, и в частности техногенного преобразования литосферы, имеют место многомасштабные явления – когда на различных отрезках пространства и времени взаимозависимые процессы действуют друг на друга с позиций устойчивого развития нелинейно. Примером может служить непоправимый ущерб, наносимый освоением железорудных месторождений КМА открытым способом окружающей природной среде, системам питьевого водоснабжения, сельскому хозяйству. Эффективность освоения участка недр на принципах устойчивого развития будет определяться эффективностью разработки и внедрения многомасштабных моделей конкретных горнотехнических систем.

Многомасштабное моделирование является ведущей методологией, развиваемой в настоящее время в мировой практике в различных областях [20–22]. Моделирование предусматривает выделение вычислительных шаблонов, которые интегрируются в программном обеспечении, реализующем оптимизированные, отказоустойчивые и энергосберегающие многомасштабные вычисления.

Ниже приведены отдельные результаты моделирования горнотехнической системы, отвечающей принципам устойчивого развития – экономическим, экологическим и социальным. Моделирование, включающее комбинации рассмотренных выше условий нового технологического уклада освоения месторождения медьсодержащих руд камерными системами разработки с закладкой твердеющими смесями, выполнено в среде AnyLogic\* [23]. В качестве базы и для сравнительной оценки результаты моделирования сопоставляли с реальными условиями разработки месторождения медьсодержащих руд. В реализуемом в настоящее время проекте предусмотрена отработка балансовых запасов, выдача всей добываемой горной массы на поверхность и подача твердеющей закладочной смеси с поверхности по традиционной технологии. По проекту срок отработки балансовых запасов 12 лет.

Условиями и ограничениями при моделировании являлись: обеспечение положительного чистого дисконтированного дохода (NPV), минимального срока окупаемости инвестиций и максимальной внутренней нормы доходности; обеспечение максимального объема выпуска товарной продукции (приведенного металла); минимизация площади земельного отвода под размещение отходов; минимизация платы за размещение отходов; обеспечение максимального срока эксплуатации осваиваемого участка недр.

Основными варьируемыми параметрами в ходе эксперимента являлись: сочетание вышеприведенных технологий [1–7], доля и содержание меди в продуктах внутрирудничной сепарации, доля дополнительно вовлекаемых в разработку руд, отнесенных к забалансовым, методом блокового подземного

выщелачивания; варианты внутрирудничного перемещения мобильных закладочных комплексов; затраты на реализацию технологий внутрирудничной сепарации, закладку выработанного пространства передвижными установками, физико-химическую геотехнологию, включая гидрометаллургический передел.

### Результаты моделирования

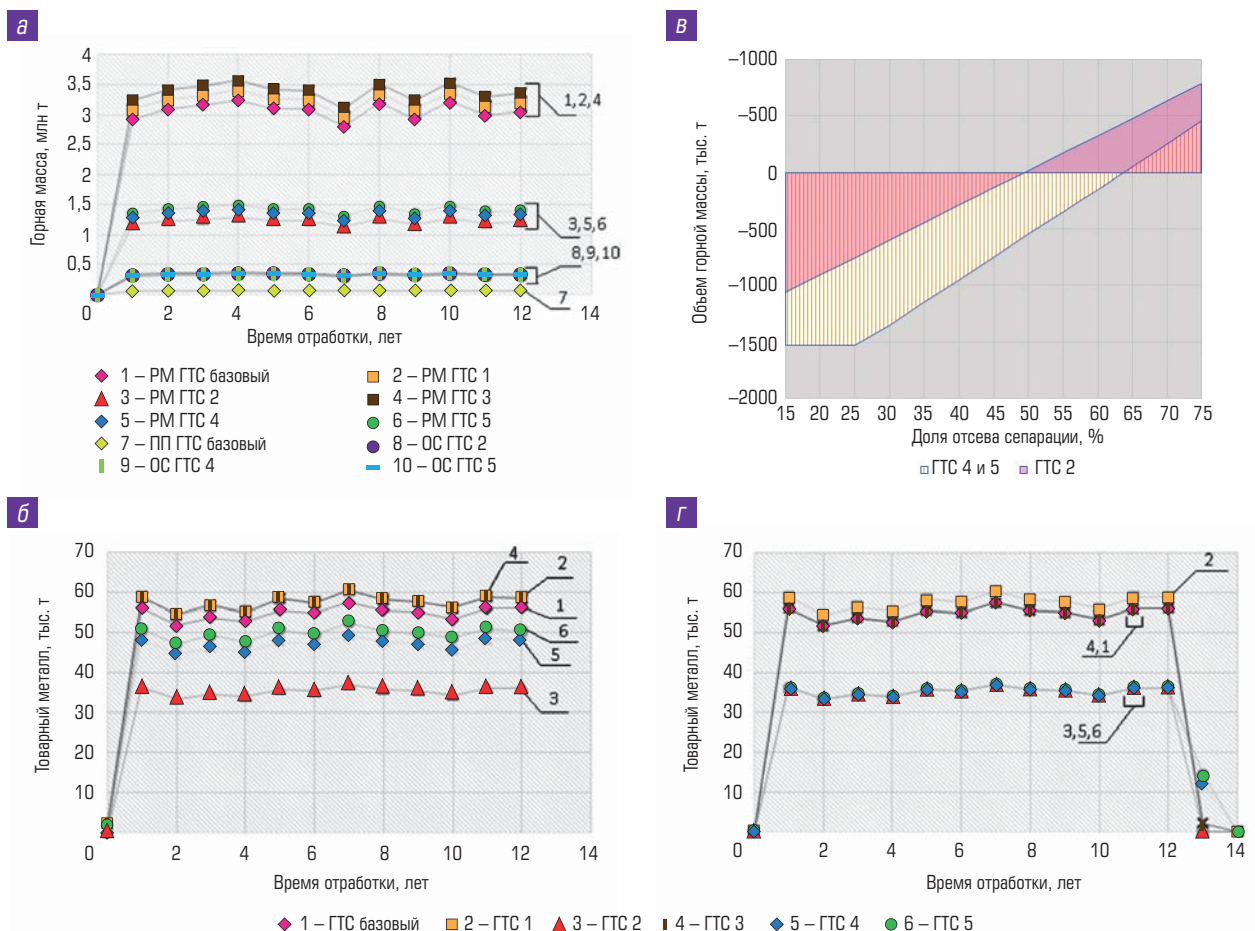
В результате моделирования выделено пять вариантов горнотехнических систем, отвечающих принципам устойчивого развития рудника, для сопоставления с базовым вариантом, по которому производительность рудника по руде составляет 3 млн т/год, по породе – 260 тыс. т/год (рис. 2, кривые 1 и 7 соответственно). Базовой ГТС соответствует годовой объем выпуска товарного металла 55 тыс. т.

Горнотехническая система (ГТС) 1 предусматривает утилизацию пород от проходки горных выработок без выдачи на поверхность на передвижных закладочных комплексах модульного типа, перемещаемых вслед за развитием фронта очистных работ. В результате моделирования установлено, что по сравнению с базовым вариантом применение подземных комплексов обеспечивает после выхода рудника на проектную мощность утилизацию до 100 % пород от проходки горных выработок (см. рис. 2, а) с соответствующим сокращением уровня негативного воздействия производства на окружающую среду.

В данном варианте на поверхность предусмотрена выдача только рудной массы. Производительность ГТС 1 по руде и металлу соответствует базовому варианту (см. рис. 2, а, кривая 2), равно как производительность по товарному металлу (см. рис. 2, б, кривая 2). Особенности проектирования ГТС 1 касаются незначительного увеличения объема горно-капитальных работ в связи со строительством камер для размещения подземных закладочных комплексов ПЗК МТ (рис. 3, а, вид Б). Вместе с тем одновременно достигается сокращение капитальных затрат за счет исключения строительства закладочных комплексов на поверхности. Установлено, что, несмотря на снижение энергозатрат в 1,2 раза, эксплуатационные затраты по данному варианту выше базового на 20 % (при отечественной плате за земельный отвод и обращение с отходами) в связи с необходимостью доставки дополнительного объема инертного наполнителя закладочных смесей с поверхности. Вместе с тем сочетание технологий добычи руд и закладки передвижными установками создает условия для заблаговременного формирования в руднике горнотехнических конструкций, используемых в других назначениях, не связанных с добычей – размещения производственных помещений, складов и т. п. (см. рис. 3, б). Проектирование ГТС с использованием надежных горнотехнических конструкций после отработки балансовых запасов полезного ископаемого позволяет рассматривать участок недр как действительный компонент среды обитания человека.

\* Создание имитационной модели и изучение параметров экологически сбалансированных геотехнологий осуществляются при поддержке РНФ (грант № 14-37-00050-П «Исследование экологически сбалансированного цикла комплексного освоения месторождений твердых полезных ископаемых» в рамках конкурса «Комплексные научные исследования, направленные на улучшение среды обитания человека»).



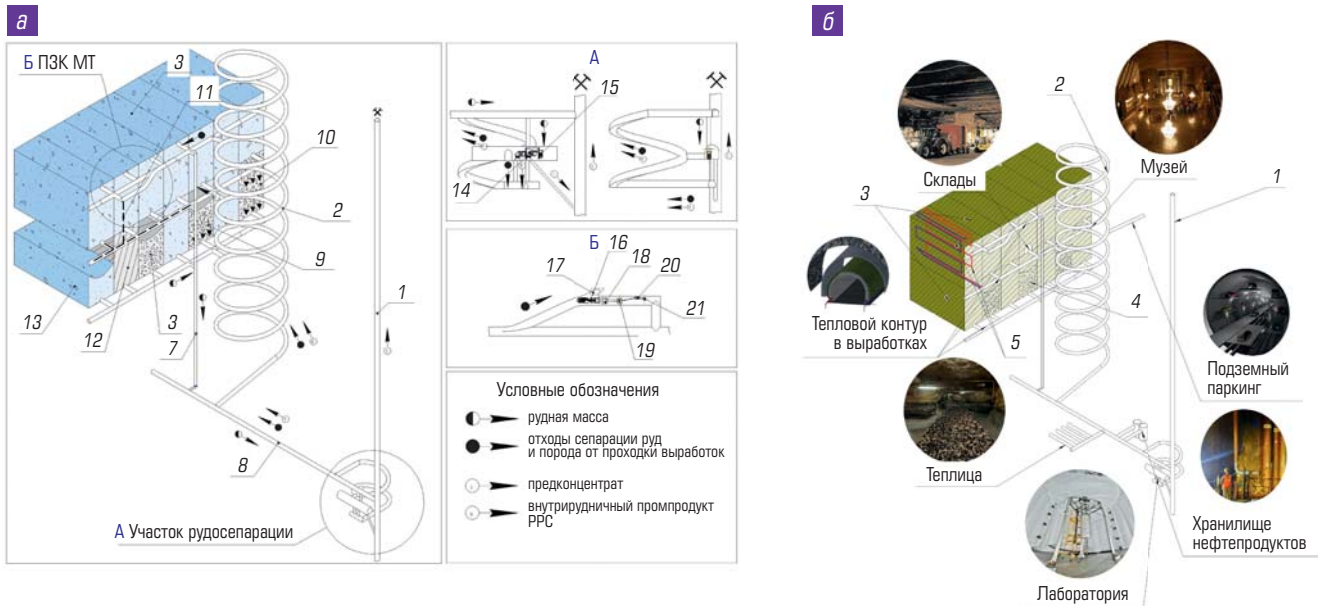


**Рис. 2. Результаты моделирования показателей функционирования горнотехнической системы после выхода на проектную производительность подземного рудника:**

*а* – объемы выдачи на поверхность горной массы, млн т/год; РМ – рудная масса, ПП – породы от проходки горных выработок; ОС – отходы внутрирудничной separации; ГТС 1–5 – индексы вариантов горнотехнических систем; *б* – количество произведенной меди при комбинировании физико-технических и физико-химических геотехнологий параллельно, тыс. т/год; *в* – номограмма к определению показателей внутрирудничной separации: 1 – в случае утилизации всего объема отходов внутрирудничной separации в твердеющей закладке (ГТС 2); 2 – в случае выщелачивания части отходов separации в подземных камерах (ГТС 4 и 5); *г* – возможности увеличения продолжительности освоения участка недр при последовательном вовлечении в эксплуатацию некондиционного сырья

*Горнотехническая система 2* отличается комбинацией технологий внутрирудничной separации на рудосортировочных станциях (см. рис. 3, *а*, вид А) в выработках рудника и утилизации пород от проходки горных выработок и отходов внутрирудничной separации в выработанном пространстве на передвижных установках. В результате моделирования установлено, что эффективность внедрения современных установок внутрирудничной separации в разы повышается при применении их на руднике вместе с передвижными закладочными комплексами, так как отходы separации являются сырьем для производства закладочных смесей. Установлено, что при принятых в ходе моделирования параметрах системы разработки и выходе отходов separации 50 % их объем полностью покрывает по-

требность рудника в инертном наполнителе закладочной смеси, т. е. отсутствует необходимость доставки его с поверхности. На рис. 2, *в* область, расположенная выше оси абсцисс, характеризует эффективность использования такой комбинации технологий. Область, лежащая ниже оси абсцисс, характеризует нехватку инертного наполнителя (этому соответствует выход отходов separации от 0 до 49,5 %, выше – их избыток). Таким образом, можно варьировать бортовым содержанием и показателями разубоживания добываемых руд. На рис. 2, *а* в качестве примера приведены кривые ГТС 2, характеризующие зависимость производительности рудника по руде, породе от проходки и отходам внутрирудничной separации при выходе последних 60 %. В ходе моделирования установлено, что в дан-



**Рис. 3. Горнотехническая система, сформированная в соответствии с принципами устойчивого развития при первоначальном проектировании этапов перехода от одного вида геотехнологий к другому (а) и на период после отработки запасов полезного ископаемого (б):**

1 – шахтный ствол; 2 – спиральный съезд; 3 – заложённое в результате отработки запасов полезных ископаемых подземное пространство; 4 – законсервированные после выщелачивания камеры; 5 – тепловой контур в массиве твердеющей закладки [24]; 6 – отбитая рудная масса; 7 – капитальный рудоспуск; 8 – квершлаг; 9 – выщелачивание отходов сепарации; 10 – выщелачивание некондиционных руд; 11 – закладочная скважина; 12 – обрабатываемая камера II очереди; 13 – закладываемая камера; 14, 15 – станция внутрирудничной сепарации; 16–21 – оборудование передвижного закладочного комплекса модульного типа (ПЗК МТ) [29, 30]

ном варианте ГТС самая низкая производительность по товарному металлу – на 44 % (см. рис. 2, б, кривая 3) ниже по сравнению с базовым вариантом. Общерудничные издержки в данном варианте на 7,5 % выше, чем при базовом. Вместе с тем полная закладка выработанного пространства, кроме технологических преимуществ и сохранения налегающей толщи и земной поверхности, открывает возможности реализации технологий, не связанных с добычей. Например, в Канаде создается технология заложения теплового контура в выработанное пространство подземных камер, заполняемых впоследствии закладочной смесью [24] (см. рис. 3, б). Возобновляемая энергетика является неотъемлемой частью устойчивого развития горнодобывающей отрасли [25–27]. Также полная твердеющая закладка выработанного пространства открывает возможности строительства в закладочных массивах сооружений различного назначения с минимальным риском деформирования налегающей толщи при длительной эксплуатации участка недр.

Горнотехнической системе 3 соответствует комбинация добычи кондиционных руд с параллельным блоковым подземным выщелачиванием некондиционных руд (см. рис. 3, а, поз. 10), а также утилизацией пород от проходки горных выработок на передвижных закладочных комплексах. Производственная мощность рудника по руде в данном варианте соответствует базовому (см. рис. 2, а, кривая 4). В результате моделирования установлено, что дополнительное вовлечение неконди-

онных руд (в базовом проекте они отнесены к забалансовым) в эксплуатацию методом блокового подземного выщелачивания позволяет увеличить выпуск товарной продукции, обеспечить полноту извлечения металла из недр.

В ходе исследования установлено, что экономическая эффективность такой комбинированной геотехнологии достигается при условии, что блоковому выщелачиванию подвергается не менее 30 % залежей забалансовых руд от количества балансовых запасов, причем извлечение меди достигается на уровне 60 %. Задачей проектирования такой ГТС является проектный учет своевременного перехода на физико-химическую геотехнологию. В ходе моделирования установлено, что в данном варианте ГТС достигается увеличение выпуска товарной продукции в 1,12 раза (см. рис. 2, б, кривая 4), что соответствует возможностям увеличения срока жизнедеятельности предприятия до 2,5 лет при условии заблаговременного ввода физико-химического передела (см. рис. 2, г, кривая 4). При большем количестве запасов забалансовых руд, например, как показано для Жезказганского месторождения [28], привлекательность данного варианта освоения месторождения повышается. Преимущества продления срока жизни предприятия особенно актуальны для моногородов, созданных в целях освоения месторождений полезных ископаемых. Ввод участков физико-химической геотехнологии и переход на новый тип сырья (продуктивные растворы) может осуществляться после отработки запасов богатых руд.

*Горнотехническая система 4* представляет собой комбинацию внутрирудничной сепарации с выдачей на поверхность только кондиционных руд, подземного выщелачивания отходов сепарации в выработанном пространстве специально подготовленных подземных камер по технологии [31] и технологии утилизации отходов с применением передвижных закладочных комплексов (см. рис. 3, а, поз. 9). Отличие данной ГТС от предыдущих вариантов состоит в том, что часть отходов внутрирудничной сепарации направляют в камеры II очереди для формирования техногенных месторождений, которые вводят в эксплуатацию методом выщелачивания либо параллельно с добычей балансовых запасов, либо на стадии их истощения. Установлено, что в данном варианте до 65 % отходов сепарации может быть утилизировано в закладке и при формировании техногенных месторождений, причем за счет последнего возможно получение дополнительного объема товарной продукции. Своевременная подготовка к этапам перехода на альтернативные геотехнологии (как в данном примере – ввод техногенных месторождений в эксплуатацию физико-химическими методами) и технологии, не связанные с добычей полезного ископаемого, должны учитываться в первоначальном проекте на отработку месторождения с соответствующим стратегическим финансовым планированием. Например, камеры, использовавшиеся ранее для установки передвижных закладочных комплексов и установок внутрирудничной сепарации, временных складов наполнителей закладочной смеси и др. заранее оборудуются под размещение лабораторий (см. рис. 3, б) [32]. Интерес представляет энергетический потенциал участка недр. Например, к последним достижениям итальянских ученых Университета Болоньи относится закладка в элементах крепи горных выработок теплового контура для работы тепловых насосов, представленного не системой труб, а рулонным геотекстилем, в котором скрыты элементы теплового контура, способного принимать форму выработки (см. рис. 3, б) [33].

*Горнотехническая система 5* является комбинацией технологий внутрирудничной сепарации, подземного выщелачивания промпродуктов сепарации в выработанном пространстве подземных камер, блокового выщелачивания некондиционных руд, а также утилизации отходов с применением мобильных закладочных комплексов (см. рис. 3, а). В ходе моделирования установлено, что в современных условиях по российскому законодательству проектному (базовому) варианту конкурентны только ГТС 3 и 5. Вместе с тем ГТС 5 обеспечивает максимальный экологический и социальный эффекты при сбалансированном уровне утилизации отходов добычи и производства товарной продукции (см. рис. 2, в). Такая ГТС обеспечивает по сравнению с базовым проектным вариантом сокращение площади зе-

мельного отвода в 4,3 раза, а также продление срока эксплуатации участка недр за счет вовлечения в эксплуатацию бедных, некондиционных руд и отходов внутрирудничной сепарации от 2 лет в зависимости от соотношения бедных и богатых руд.

### Заключение

Проект ГТС, обеспечивающей экологические и социальные показатели устойчивого развития, должен решать проблему своевременного перехода к другим направлениям использования участка недр – на период после завершения добычи полезных ископаемых. Говоря о целенаправленной трансформации участка недр, подразумевают реализацию строительных геотехнологий, как неотъемлемой части нового технологического уклада освоения недр, соответствующего устойчивому развитию горных предприятий. В результате заблаговременного перехода на альтернативные направления недропользования недр становятся полноценной средой обитания человека, а не только производственной зоной на время добычи полезного ископаемого.

В рассмотренной постановке устойчивого развития исчезает понятие исчерпаемости недр, несмотря на отработку балансовых запасов. Достижение целей устойчивого развития возможно только на базе синхронной трансформации геотехнологий и техногенно преобразуемого участка недр.

В настоящее время применительно к каждому рассматриваемому участку горного массива (блоку, камере, выработке, целику) еще на стадии проектирования возможен дифференцированный подход в части этапов его наиболее рационального освоения и управления состоянием как в целях добычи полезного ископаемого, так и на период после отработки балансовых запасов. Это становится возможным в современных условиях обработки метаданных, многомасштабного моделирования, установления обратных связей между характеристиками техногенно изменяемых недр и достижениями геотехнологий. Полный цикл комплексного освоения необходимо проектировать не столько для добычи полезных ископаемых, сколько в целях эксплуатации каждого осваиваемого участка недр неопределенно долго, путем первоначального проектирования этапов перехода от одного вида геотехнологий к другому в ходе освоения месторождений, а также на период после завершения добычи полезных ископаемых. Такой подход является содержанием устойчивого функционирования подземных рудников.

### Библиографический список

См. англ. блок. [ГХ](#)

«GORNYI ZHURNAL», 2017, № 11, pp. 52–59  
DOI: 10.17580/gzh.2017.11.10

**Design philosophy and choice of technologies  
for sustainable development of underground mines**

**Information about authors**

**D. R. Kaplunov**<sup>1</sup>, Professor, Doctor of Engineering Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences

**D. N. Radchenko**<sup>1</sup>, Senior Researcher, Associate Professor, Candidate of Engineering Sciences, mining\_expert@mail.ru

<sup>1</sup> Institute of Integrated Mineral Development – IPKON, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**Abstract**

In the article, based on the analysis of the world experience and generalization of the results of the authors' own research, the directions for the development of the design of underground mines have been determined and the technologies providing for the sustainable development of mines have been proposed. The prospects of practical application of the principles of sustainable development in mining design are shown. The definition of sustainable development of mines is given, which is achieved by rapid adaptation of geotechnologies to changing conditions. The concept of a new technological paradigm, designed to ensure the sustainable development of underground mines, is disclosed. In terms of underground development of nonferrous and precious metals deposits, generic design solutions aimed at ensuring the sustainability of mining in changing ground conditions and taking into account the economic, environmental and social aspects of the sustainable development are proposed. It is established that the achievement of the sustainable development goals is possible only on the basis of synchronous transformation of geotechnologies and anthropogenically transformed subsoil plot. The full-cycle integrated development objective is not only mineral extraction but operation of a subsoil area for an indefinitely long period of time, based on preliminary design of transition between geotechnologies, and for the period after completion of mining. This approach is the substance of the sustained performance of underground mines.

Creation of the simulation model of the investigation of parameters of the ecologically-balanced geotechnologies are carried out with the support of the Russian Scientific Funds (grant No. 14-37-00050-П "Investigation of the ecologically-balanced cycle of the complex mastering of hard mineral deposits" within the contest "Complex scientific investigations aimed on the deterioration of the human environment").

**Keywords:** ore deposits, sustainable development, underground mine, geotechnology, mining system, patterns of functioning, new technological paradigm, mine design.

**References**

1. Humphreys D. Sustainable development: can the mining industry afford it? *Resources Policy*. 2001. Vol. 27, Iss. 1. pp. 1–7.
2. Pimentel B. S., Gonzalez E. S., Barbosa G. N. O. Decision-support models for sustainable mining networks: fundamentals and challenges. *Journal of Cleaner Production*. 2016. Vol. 112. pp. 2145–2157.
3. Espinoza R. D., Rojo J. Towards sustainable mining (Part I): Valuing investment opportunities in the mining sector. *Resources Policy*. 2017. Vol. 52. pp. 7–18.
4. Reyes-Bozo L., Godoy-Faúndez A., Herrera-Urbina R., Higuera P., Salazar J. L. et al. Greening Chilean copper mining operations through industrial ecology strategies. *Journal of Cleaner Production*. 2014. Vol. 84. pp. 671–679.
5. Erzurumlu S. S., Erzurumlu Y. O. Sustainable mining development with community using design thinking and multi-criteria decision analysis. *Resources Policy*. 2015. Vol. 46. pp. 6–14.
6. Melnikov N. N. Aspects of stability of mining-industrial complex of Russia. *Anniversary symposium on development of new ways and technologies of Earth soil mastering : thesis of reports*. Moscow : IPKON RAN, 1999. pp. 24–26.
7. Trubetskoy K. N., Galchenko Yu. P., Burtsev L. I. Ecological problems of soil mastering during the stable development of nature and society. Moscow : Nauchtekhizdat, 2003. 261 p.
8. Chanturiya V. A. Prospects of stable development of mining-processing industry of Russia. *Gornyi Zhurnal*. 2007. No. 2. pp. 2–9.
9. Trubetskoy K. N., Kornilkov S. V., Yakovlev V. L. About new approaches to provision of stable development of mining. *Gornyi Zhurnal*. 2012. No. 1. pp. 15–19.
10. Vasilchuk M. P., Trubetskoy K. N., Ilin A. M., Zimich V. S., Chanturiya V. A. et al. Soils and general considerations of ecological safety of their mastering. *Gornyi Zhurnal*. 1995. No. 7. pp. 17–21.
11. Huangqing Li, Xiaozhao Li, Chee Kiong Soh. An integrated strategy for sustainable development of the

- urban underground: From strategic, economic and societal aspects. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2016. Vol. 55. pp. 67–82.
12. Population: Our growing population. United Nations. Available at: <http://www.un.org/en/sections/issues-depth/population/index.html> (accessed: 15.04.2017).
13. Glazev S. Yu. Theory of long-term technical and economic development. Moscow : VIdar, 1993. 310 p.
14. Sadovnichiy V. A., Akaev A. A., Korotaev A. V., Malkov S. Yu. Modeling and forecasting of global dynamics. Moscow : ISPI RAN, 2012. 359 p.
15. Trubetskoy K. N., Chanturiya V. A., Kaplunov D. R., Rynnikova M. V. Complex mining of deposits and deep processing of mineral raw materials. Moscow : Nauka, 2010. 437 p.
16. Aynbinder I. I., Rodionov Yu. I., Patskevich P. G. New underground mineral mining approaches. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2008. No. 5. pp. 89–97.
17. Pakhaluev V. F., Galchenko Yu. P., Sabyanin G. V. Experience of realization of ideas of frame geotechnology for saving the water-bearing horizons at Yaroslavlskoe deposit. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*. 2011. No. 11. pp. 130–137.
18. Kaplunov D. R., Radchenko D. N. Mined-out areas: Approaches to multipurpose use in complete integrated cycle of hard mineral mining. *Gornyi Zhurnal*. 2016. No. 5. pp. 28–33. DOI: 10.17580/gzh.2016.05.02
19. Kartoziya B. A., Korchak A. V., Levchenko A. N. Theoretical and practical problems of subsoil development under megacities. *Gornyi Zhurnal*. 2014. No. 9. pp. 60–64.
20. Karabasov S., Nerukh D., Hoekstra A., Chopard B., Coveney P. V. Multiscale modeling: approaches and challenges. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2014. Vol. 372, Iss. 2021. 3 p. Available at: <http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/roypta/372/2021/20130390.full.pdf> (accessed: 15.04.2017).
21. Hoekstra A., Chopard B., Coveney P. Multiscale modeling and simulation: a position paper. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2014. Vol. 372, Iss. 2021. 8 p. Available at: <http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/roypta/372/2021/20130377.full.pdf> (accessed: 15.04.2017).
22. Alowayyed S., Groen D., Coveney P. V., Hoekstra A. G. Multiscale computing in the exascale era. *Journal of Computational Science*. 2017. Vol. 22. pp. 15–25.
23. Borshchev A. The Big Book of Simulation Modeling. Multimethod Modeling with AnyLogic 6. AnyLogic North America, 2013. 614 p. Available at: <https://www.anylogic.ru/resources/books/big-book-of-simulation-modeling/> (accessed: 15.04.2017).
24. Ghoreishi-Madiseh S. A., Hassani F. P., Abbasy F. Development of a novel technique for geothermal energy extraction from backfilled mine stopes. *The 11th International Symposium on Mining with Backfill*. Perth : Australian Centre for Geomechanics PP, 2014. pp. 61–72.
25. McLellan B. C., Corder G. D., Giurco D. P., Ishihara K. N. Renewable energy in the minerals industry: A review of global potential. *Journal of Cleaner Production*. 2012. Vol. 32. pp. 32–44.
26. Kaplunov D. R., Rynnikova M. V., Radchenko D. N. Utilization of renewable energy sources in hard mineral mining. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2015. No. 1. pp. 88–96.
27. Rynnikova M. V., Manevich L. I., Eremenko V. A., Smirnov V. V. Utilization of elastic energy of rock mass as a source of renewable energy. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2015. No. 6. pp. 119–132.
28. Rynnikova M. V., Yun A. B., Terenteva I. V. Prospects and development strategy of Jezkazgan deposit. *Gornyi Zhurnal*. 2015. No. 5. pp. 44–49. DOI: 10.17580/gzh.2015.05.09
29. Mannanov R. Sh., Zverev A. P., Angelov V. A., Lavenkov V. S. Research of compositions and methods of preparation of filling mixtures on underground mobile stowage units. *Marksheyderskiy vestnik*. 2012. No. 3. pp. 12–16.
30. Lavenkov V. S. Development openings cross-sectional area justification with using of mobile underground backfill equipment. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*. 2015. Special issue No. 15. *Conditions of stable functioning of mineral-resource complex of Russia*. Iss. 3. pp. 96–104.
31. Kaplunov D. R., Rynnikova M. V., Radchenko D. N., Abdrahmanov I. A., Alimbetov A. F. et al. Method for comprehensive development of complex ore fields. Patent RF, No. 2327873. Applied: 25.09.2006. Published: 27.06.2008. Bulletin No. 18.
32. Toth C. Overview of the Laboratory: Background to the Laboratory. Science and Technology Facilities Council. Boulbe Underground Laboratory. Available at: <https://www.boulbe.stfc.ac.uk/Pages/Overview-of-the-Laboratory.aspx> (accessed: 15.04.2017).
33. Tinti F., Boldini D., Ferrari M., Lanconelli M., Kasmaee S. et al. Exploitation of geothermal energy using tunnel lining technology in a mountain environment. A feasibility study for the Brenner Base tunnel – BBT. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2017. Vol. 70. pp. 182–203.