

## О ПРИНЦИПАХ ПЕРЕХОДА ГОРНОДОБЫВАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ К УСТОЙЧИВОМУ ЭКОЛОГИЧЕСКИ СБАЛАНСИРОВАННОМУ РАЗВИТИЮ

Д.Р. Каплунов<sup>1</sup>, В.А. Юков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем комплексного освоения недр РАН, Москва, Россия, e-mail: info@ipkonran.ru

**Аннотация:** Горнодобывающее предприятие рассматривается как самостоятельная организационно-финансовая структура по выпуску профильной продукции, включающая как минимум добычу, обогащение и металлургию. Основная идея устойчивого, регулируемого развития предприятия состоит в создании условий для дальнейшей непрерывающейся работы без превышения определенного экологического предела. Представлены принципы, отражающие повышенное влияние экологического фактора, которые следует учитывать на разных этапах создания горного предприятия. Воздействие горных работ на окружающую среду определяется на основе максимально допустимо нагрузки на экосистему с ее естественным восстановлением. Представлены следующие положения, обеспечивающие условия устойчивого функционирования предприятия: приоритетность вовлечения месторождения в разработку, его отдаленность, обеспечение прироста запасов, допустимые пределы колебания производительности и содержания металла, разделение систем подземной разработки по заполнению выработанного пространства отходами, схема малоотходной технологии с использованием сопутствующих процессов смежных отраслей, эффективность переработки материалов техногенных образований и предварительного обогащения, цена единицы готовой продукции и прочие ресурсные ограничения. С учетом экологических ограничений для реализации устойчивого развития. определены направления развития создаваемых геотехнологий.

**Ключевые слова:** горное предприятие, принципы, условия, устойчивое развитие, экологический фактор.

**Для цитирования:** Каплунов Д.Р., Юков В.А. О принципах перехода горнодобывающего предприятия к устойчивому экологически сбалансированному развитию // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 3. – С. 74–86. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-3-0-74-86.

### Principles of a mine transition to sustainable and environmentally sound development

D.R. Kaplunov<sup>1</sup>, V.A. Yukov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Problems of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources  
of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, e-mail: info@ipkonran.ru

**Abstract:** A mine is considered as an independent organization-and-financial structure of specialized production including mining, processing and metallurgy. The major idea of the sustain-

able and adjustable development of a mine consists in creation of conditions for never-ceasing operation without trespassing of a certain environmental threshold. The principles reflective of the increased influence of the ecological factors to be taken into account at different stages of establishing a mine practice are presented. The environmental impact of a mine is governed by the maximum allowable load of ecosystem with its natural recovery. The provisions of sustainable mine functioning involve: setting priority of a mineral deposit, its remoteness, feasible increment of reserves, allowable ranges of production output and metal content, distinguishing of underground mining systems by waste backfill, low-waste technology using auxiliary processes from allied sectors, efficiency of waste processing and pre-treatment, unit product price and other resource-based constraints. With regard to the environmental restrictions of the sustainable development, the trends of advancement of new geotechnologies are identified.

**Key words:** mine, principles, conditions, sustainable development, ecological factor.

**For citation:** Kaplunov D. R., Yukov V. A. Principles of a mine transition to sustainable and environmentally sound development. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(3):74-86. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-3-0-74-86.

---

## Введение

Добыча полезных ископаемых является необходимой составляющей жизнедеятельности человека. От современной организации производства и накладываемых на него в будущем ограничений и допусков будет зависеть сохранение сложившегося подвижного равновесия природной среды.

Процессы добычи сырья приводят к изменениям окружающей природы. Использование извлекаемых природных ресурсов связано с загрязнениями, отходами производства. Объем отходов, поступающих в окружающую среду, примерно равен разнице между объемом извлекаемого сырья и получаемого из него полезного продукта. В процессе добычи и переработки происходит: отчуждение земли под создаваемые объекты, нарушение природного массива, потребление воды и кислорода воздуха, загрязнение прилегающих территорий.

Перспективы качественного изменения в развитии добычи полезных ископаемых сегодня связаны с реализацией основных принципов концепции устойчивого развития (sustainable development): «треугольника» общество – экономика – окружающая среда.

В зарубежной литературе много публикаций, затрагивающих разные аспекты устойчивого развития. Так, например, развита методология включения объединенных экологических и социальных показателей непосредственно в модель геологического блока для минимизации воздействия на окружающую среду [1].

В исследовании [2], в котором представлен новый алгоритм с учетом технических, экономических, экологических и социальных аспектов, показано, что при металлургической переработке бедных медных руд не только возрастает дисконтированный доход рудников, но и снижается негативное воздействие на окружающую среду.

На открытых работах уделено внимание количеству добываемых запасов, коэффициенту вскрыши, расположению отвалов, дамб и хвостохранилища с целью определения площади земель, которая будет нарушена по окончании горных работ для определения ограничений и сохранения устойчивого развития [3].

Очевидно, что включение экологических издержек значительно влияет на процесс оптимизации карьера – существенно снижается рентабельность [4].

Предпринята попытка количественно оценить влияние главных критериев устойчивого развития на работу карьера. Экологическая, экономическая и социальная компоненты составляют соответственно 25, 38, 36% [5]. В специализированном издании *Journal of Sustainable Mining* картина аналогична. На основе изучения 25-летнего опыта работы артелей и малых рудников Канады представлены меры, которые позволили бы им функционировать в условиях социально-экономической реформы [6]. Проект социальной корпоративной ответственности рассматривается как средство поддержки разработки угольных регионов [7]. Экспертная оценка мероприятий по поддержке работы большинства золотых рудников Ганы определила их как наиболее практичное приближение к устойчивому развитию [8].

Таким образом, в центр внимания большинства авторов попадают либо мелкие детали, либо ключевые критерии без попытки систематизации факторов, влияющих на устойчивое экологическое сбалансированное развитие горных предприятий.

### **Основные принципы устойчивого, экологически сбалансированного освоения георесурсов**

В настоящее время отдельных рудников практически не существует. Все они входят в состав ГОК или ГМК (в зависимости от степени — стадийности переработки сырья), т.е. более крупной организационной структуры — предприятия по выпуску профильной продукции с самостоятельной организационно-финансовой структурой.

В общем виде принципы экологически сбалансированного освоения георесурсов представлены в [9]. Наилучшие условия устойчивого, экологически сбалансированного развития горных предприятий в настоящее время и особенно

в перспективе обеспечивает комбинированная геотехнология, которая за счет комплексирования различных технологических процессов позволяет эффективно управлять добычей сырья и воспроизводством запасов на различных стадиях жизненного цикла горных предприятий. Принципы, обеспечивающие устойчивое и экологически сбалансированное освоение участка недр на базе комбинированных геотехнологий, приведены в [10].

Основная идея устойчивого (регулируемого) развития горного предприятия заключается в создании условий для его непрерывающейся работы без превышения определенного экологического предела (без видимого нарушения). Поэтому при создании горного предприятия необходимо учитывать возрастающее влияние экологического фактора.

Принципы экономически эффективного и экологически безопасного освоения недр должны включать:

- стремление сохранить равновесное состояние экосистемы на всех последовательных этапах: прогноз, обоснование, проектирование, реализация;
- определение максимально допустимой нагрузки на экосистему с возможностью ее естественного восстановления;
- своевременное пополнение сырьевых ресурсов, компенсирующих их убыль и потери при отработке;
- создание и применение технологий, не превышающих допустимую нагрузку на экосистему (малоотходные технологии), сводящих к минимуму потери сырья;
- наиболее полное извлечение основных и попутных компонентов из добытых руд;
- использование выработанных пространств карьеров, рудников и техногенных полостей для размещения, в первую очередь, отходов добычи, обогащения и

металлургии, а при возможности — промышленных и других объектов;

- применение инновационных технологий для придания техногенным отходам свойств, превращающих их в новое сырье;

- создание комплексной системы экологического мониторинга, включающей контроль атмосферного воздуха, подземных и поверхностных водных объектов, почвы и образования отходов;

- объединение разнонаправленных интересов государства, недропользователей и населения — регулирование всего процесса недропользования в целом.

Цель мониторинга — проведение комплексной оценки воздействия горных работ на окружающую среду.

Наблюдения, проводимые на предприятии, позволяют достоверно оценить воздействие отдельных процессов, технологий, переделов, цехов на отдельные экологические компоненты. Выполненные наблюдения, замеры, анализ полученных данных позволяют разработать мероприятия, снижающие техногенное давление на природную среду. Например, сегодня природоохранная деятельность направлена на снижение опасности отходов. Результаты анализа могут показать необходимость разработки мероприятий по снижению пыления отвалов и хвостохранилищ путем увеличения площадей рекультивации, вовлечения «лежалых» хвостов как техногенного сырья в переработку, а также необходимость перехода на бесцианидную схему обогащения, на приобретение нового оборудования или схем газоочистки на металлургическом переделе.

Комплексная оценка проводится для получения количественных и качественных показателей и для представления о масштабах загрязнения в сопоставлении с максимально допустимой нагрузкой, при которой масштаб и глубина по-

ражения природной среды не нарушает ее способности самовосстановления после окончания эксплуатации месторождения.

Компьютерное имитационное моделирование позволяет системно установить результаты экологического воздействия отдельных объектов на природную среду и их взаимодействие в природно-техногенной системе. Кроме того, оно позволяет выделить объекты, вносящие наибольший вклад в нагрузку на элементы экосистемы (атмосфера, почвенный покров, водотоки), установить долю их влияния на компоненты природной среды с получением количественной оценки. Полученные результаты позволяют принимать более обоснованные решения в предпроектных проработках относительно приоритетных направлений природоохранной деятельности.

В силу указанных обстоятельств наблюдаются протесты населения против строительства некоторых предприятий (например, Медногорского ГОКа на базе Еланского и Елкинского медно-никелевых месторождений в Воронежской области; Томинского ГОК на базе одноименного месторождения медно-порфириновых руд в Челябинской области; Сибайского отработанного карьера по добыче медно-колчеданных руд). Подобные проявления сдерживают социально-экономическое развитие регионов.

Различная направленность интересов при освоении недр объясняется государственной собственностью на недра, частной собственностью компаний, использующих ресурсы недр, и общенациональными интересами. Необходим единый свод норм и правил, регулирующий общественные взаимоотношения в сфере недропользования.

При создании предприятия, при разработке проектной документации целесообразно руководствоваться следующими положениями, обеспечивающими

условия его устойчивого функционирования.

Приоритетность вовлечения месторождения в разработку устанавливается экспертным анализом на основе оценки весомости месторождения [11].

Обеспечение прироста запасов не ниже ежегодно расходуемого объема: от 1/15 для высокоценного сырья до 1/30 для месторождений с наличием богатых руд. Оценка пригодности к разработке месторождений в радиусе 300–500 км от действующего предприятия ведется в условиях уже сложившейся инфраструктуры. Непрофильные полезные ископаемые в окрестностях предприятия оцениваются не на локальной, а на региональной основе.

Сведение многих природных типов руд в несколько технологических сортов на основе дополнительного геологического изучения и исследований в том числе и на обогатимость для системы их раздельной выемки.

Учет дальности перевозок руды и концентрата ведется для расширения минерально-сырьевой базы действующего предприятия и для определения затрат на получение конечной продукции для отдаленных месторождений.

Оценка потенциальной экономической состоятельности проектов горных предприятий с учетом неопределенности исходных данных и будущих экономических показателей дает понимание, что колебание текущей производительности рудника, карьера допустимо в пределах 0,9–1,5 от оптимальной, а содержание металла в руде — в пределах 0,7–1,3 от проектируемого.

Как известно, основным источником негативного воздействия на окружающую среду являются отходы, образующиеся при извлечении из недр и переработке полезных ископаемых.

При подземной разработке мощных рудных месторождений выход пустых

пород из горно-капитальных работ составляет 14–16 м<sup>3</sup> на 1000 т руды и увеличивается до 20–25 м<sup>3</sup> на маломощных. На очистных работах объем пустых пород на мощных месторождениях составляет 6–10 м<sup>3</sup> на 1000 т выдаваемой рудной массы, а на маломощных со сложным складчатым залеганием достигает 50 м<sup>3</sup>.

Руды цветных металлов отличаются низким содержанием полезных компонентов: от нескольких десятых долей процента до единиц процентов. Обычно полезно используется не более 1–5% горной массы. Поэтому при их обогащении возникают обширные хвостохранилища, связанные с изъятием земель из хозяйственного оборота.

Выход отходов при подземной разработке значительно ниже, чем при открытой. Поэтому с позиции экологии подземные горные работы должны быть отнесены к малоотходным. Кроме того, нет принципиальных трудностей для почти полного размещения попутно добываемых пустых пород в выработанном пространстве, поскольку рудосортировочные станции выводят из рудной массы до 50% отвальных пород и создают условия для обеспечения закладочных работ инертными заполнителями, непосредственно образующимися при добыче.

Системы разработки, применяемые на подземных рудниках, можно разделить на три группы.

1. С обрушением руды и вмещающих пород (подэтажное и этажное обрушение, слоевое обрушение). Возможность размещения породы от проходки горно-капитальных выработок на месте будущих провалов. Отсыпка пород от проходки горноподготовительных выработок в образовавшиеся провалы.

2. С открытым очистным пространством и с оставлением целиков (камерно-толбовая, этажно-камерная, подэтажные

штреки). Возможность размещения в выработанном пространстве пород от проходки и хвостов обогащения.

3. С закладкой выработанного пространства (горизонтальные слои, этажно-камерная с твердеющей закладкой). Максимально возможная утилизация хвостов обогащения и пород от проходки без выдачи на поверхность.

Основой объединения служит уровень воздействия на природу и возможности заполнения создаваемого выработанного пространства отходами горно-обогатительного производства.

На шахте им. Губкина при этажно-камерной системе разработки отработанные камеры заполняют гидравлической закладкой на основе хвостов обогащения, которые составляют 75–76% от извлекаемой массы кварцитов [12, 13]. Одновременно решена проблема транспортировки отходов. Отпала необходимость перекачки пульпы на 17 км в хвостохранилище Лебединского ГОК.

Авторами были изучены пять вариантов отработки месторождения: горизонтальные слои с твердеющей закладкой, подэтажное обрушение, подэтажные штреки, подземное блоковое выщелачивание, скважинное подземное выщелачивание с содержанием условной меди 0,5, 1,5 и 3,0%.

Наиболее эффективным оказался вариант разработки подэтажными штреками с последующим кучным выщелачиванием. Во всем рассматриваемом диапазоне дисконтирования (5–25%) его рентабельное применение начинается с самой низкой стоимости металла. Варианты физико-химического способа разработки лучше наиболее универсальной и наиболее дорогой системы горизонтальных слоев с твердеющей закладкой, а при норме дисконта до 13% успешно конкурируют с подэтажным обрушением с кучным выщелачиванием. По мере увеличения глубины горных работ эко-

номическая эффективность технологий подземного выщелачивания возрастает.

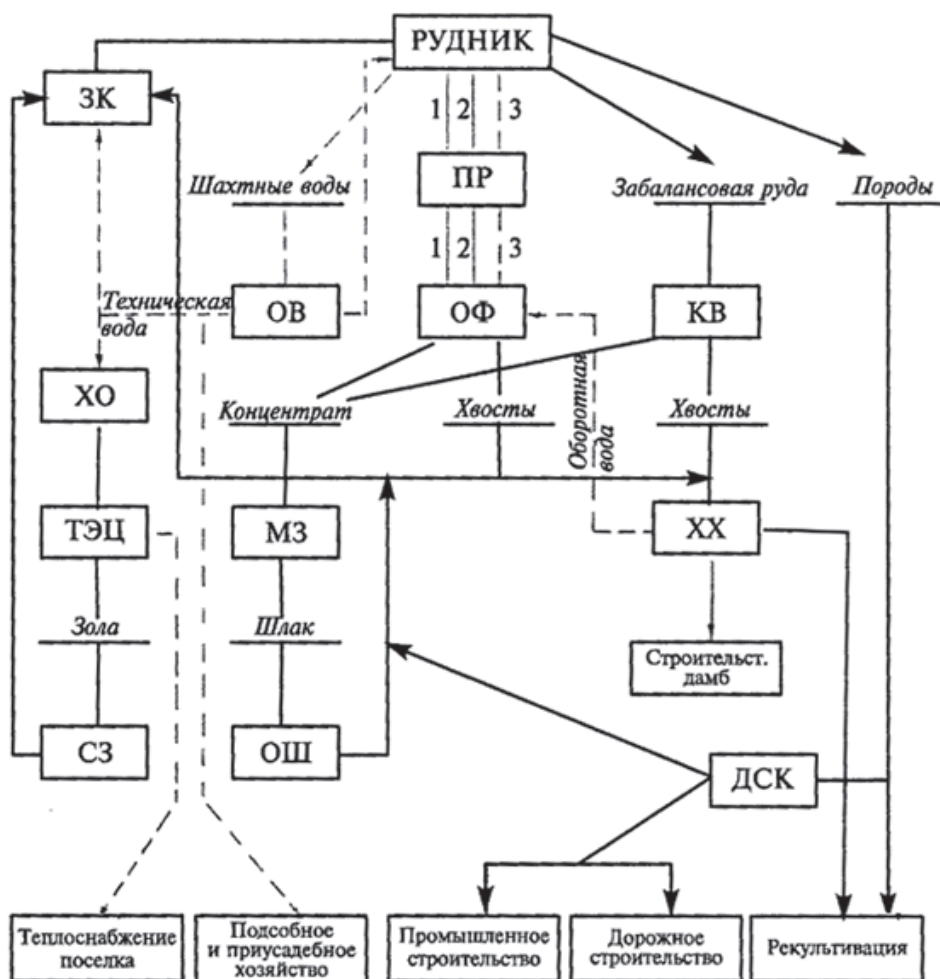
Сопоставление на той же основе подземного блокового и скважинного выщелачивания показало некоторое преимущество блокового по отношению к скважинному. Использование методов подземного выщелачивания позволяет ликвидировать хвостохранилища и высвободить занимаемые ими земли; сократить объемы выдаваемых пустых пород и, соответственно, площадей земли под ними. На рудниках средней мощности в зависимости от применяемой системы разработки (с твердеющей закладкой или с обрушением) сокращение площадей под отвалами пустых пород и хвостохранилищами составляет 1,7–4,0 раза, кроме того, поверхность не нарушается воронками. Можно ожидать сокращения общих капитальных затрат примерно в 1,5 раза и общих эксплуатационных расходов примерно вдвое.

Для разработки рудного месторождения подземным способом принципиальная схема малоотходной технологии добычи и переработки руды представлена на рисунке.

Для подземной разработки месторождения свойственны процессы, выполняемые на поверхности — кучное выщелачивание, обогащение, металлургическая переработка и др. В малоотходной схеме, помимо традиционных, задействованы сопутствующие процессы: теплоснабжение поселка, подсобное и приусадебное хозяйство, промышленное и дорожное строительство, рекультивация, где используются шахтные воды и добываемые пустые породы. Оставшаяся часть отходов размещается в виде малых отвалов и хвостохранилищ и изолируется от окружающей среды путем рекультивации, восстановления нарушенных земель.

При системе разработки нисходящими слоями с твердеющей закладкой, са-





Принципиальная схема малоотходной технологии подземной разработки: 1, 2, 3 – технологические сорта руды; ПР – предконцентрация руд (поверхностная или подземная); ЗК – закладочный комплекс; ОВ – очистка шахтных вод; ОФ – обогатительная фабрика; КВ – кучное выщелачивание руды; ХО – химическая очистка воды от солей; МЗ – металлургический завод; ХХ – хвостохранилище; ТЭЦ – теплоэлектроцентральный; СЗ – сгущение золы; ОШ – обеднение шлаков; ДСК – дробильно-сортировочный комплекс

Basic diagram of low-waste underground mining technology: 1, 2, 3—process grades of ore; PC—pre-concentration (surface or in-situ); BP—backfill plant; MWT—mine water treatment; PP—processing plant; HL—heap leaching; CR—chemical removal of salt from water; MP—metallurgical plant; TP—tailings pond; TS—thermal station; AT—ash thickening; SD—slime depletion; CPP—crushing-and-preparation plant

мой «закладкоемкой», при содержании в руде полезного компонента менее 1% в выработанном пространстве удается разместить только 74% добываемой горной массы [14].

При оставании рекультивации от горных работ не более чем на 2–3 года за-

траты на рекультивацию в себестоимости добываемой руды и угля могут достигать 6–10% [15].

Закладочные комплексы, размещаемые, под землей позволяют: утилизировать пустую породу от проходки выработок без выдачи ее на поверхность,

сократить расстояния транспортировки закладочных смесей, снизить капитальные вложения в закладочное хозяйство и уменьшить эксплуатационные расходы. Существующие проектные решения по строительству подземных закладочных комплексов, в частности, для СУБР, снижают себестоимость 1 м<sup>3</sup> закладочной смеси в 1,14–1,45 раза, а стоимость их строительства в 1,17–2,25 раза по сравнению с поверхностной установкой.

Подземный горно-обогатительный комплекс является наиболее кардинальным ресурсосберегающим решением. Опыт работы подземных ГОКов за рубежом [16] подтвердил эффективность такого решения.

Для Октябрьского медно-никелевого месторождения было определено место расположения подземной обогатительной фабрики [17]. Помимо резкого снижения остроты экологической проблемы, на 20–30% снижаются затраты на транспорт и сокращаются затраты на закладочные работы.

Производственная деятельность допустима в пределах, не нарушающих устойчивость комплексной эколого-экономической системы. В настоящее время экономические и экологические последствия горного производства принято рассматривать на основе стоимостной оценки путем сопоставления результатов освоения недр с экологическим ущербом, наносимым природной среде.

Оценка ущерба природной среде выполняется по СНИП 1.02.01.-85. Ущерб от нарушения и загрязнения  $\mathcal{E}_y$  окружающей среды является комплексной величиной:

$$\mathcal{E}_y = \mathcal{E}_3 + \mathcal{E}_A + \mathcal{E}_B,$$

где  $\mathcal{E}_3$  — ущерб от нарушения и отчуждения земель,  $\mathcal{E}_3 = \sum(C_i S_i)$ ;  $C_i$  — ценность земель  $i$ -го качества (тыс. руб./га);  $S_i$  — сумма площадей земель  $i$ -го качества, отчуждаемых к рассматриваемому году;  $\mathcal{E}_A$  — ущерб от загрязнения

атмосферы;  $\mathcal{E}_B$  — ущерб от нарушения гидрогеологического режима и загрязнения водных источников.

Приведенную формулу предлагается пополнить четырьмя слагаемыми.

$V_y$  — упущенная выгода от неиспользования экологически нарушенных земель (вод, ландшафта, растительности и др.), руб.

$V_B$  — затраты на восстановление экологически нарушенных земель (вод, ландшафта, растительности и др.), руб.

Поскольку, наряду с изъятием из запасов земельных ресурсов с нарушением, становятся загрязненными земли, добавляется еще два слагаемых.

$V_{y1}$  — упущенная выгода от неиспользования экологически загрязненных земель (вод, ландшафта, растительности и др.), руб.

$V_{B1}$  — затраты на восстановление экологически загрязненных земель (вод, ландшафта, растительности и др.), руб.

СНИП 1.02.01.85 был последовательно заменен на СНИП 11 01-95 и СП 11-101-2003. Но оба новых документа были отменены постановлениями Госстроя России от 17.02.2003 г. № 18 и от 17.11.2003 г. № 190.

Разработка месторождений сопровождается образованием техногенных отходов, содержащих полезные компоненты. Их характеристика представлена в [18]. С точки зрения пригодности, возможности доизвлечения и получения из них ценных продуктов техногенные образования следует оценивать по получаемой ценности продуктов, которая должна превышать затраты на их извлечение.

Выполненная авторами оценка в условиях действующего предприятия, где имеются возможности по организации отработки материалов техногенных образований и их последующей переработки, показала, что наибольший эффект связан с переработкой хвостов обогаще-



ния как по металлу (в связи с их количеством), так и по высвобождению земли.

Техногенные образования могут рассматриваться как исходный материал для получения сырья нового качества. Получение качественно новых свойств возможно при воздействии химическими или физическими методами, если они разработаны. Например, воздействие физическими полями.

Предварительное обогащение рассматривается как средство повышения эффективности горных работ. Комбинированная схема радиометрического обогащения объединяет крупнопорционную сортировку и покусковую сепарацию. На 25–35% выхода хвостов при сортировке накладывается 30–40% при сепарации, что в благоприятных условиях может составить 50–55%. Однако общие потери металла при предобогащении достигают 6% [19, 20]. Для возвращения основного потерянного металла в дальнейшую переработку целесообразно кучное выщелачивание. Получаемая в результате дополнительная прибыль резко повышает показатели и позволяет компенсировать дополнительные затраты на сооружение участка выщелачивания. При включении комбинированной схемы предобогащения в проекте рудника необходим участок кучного выщелачивания, позволяющий обеспечить полный цикл комплексного освоения, и тем самым — лучшие общие показатели эксплуатации недр.

Изменение параметров буровзрывных работ также повышает эффективность рудничной покусковой сепарации. Оценка по методу учета неопределенности показала, что снижение кондиционного куска руды с 0,4–0,5 м до 0,2 м, достигаемое за счет сгущения сетки скважин и увеличения расхода ВВ на отбойку, превращает сепарацию в эффективное средство предварительного обогащения. Дополнение его передвиж-

ными дробильными установками перемещает начало процесса предобогащения на места ведения горных работ. Последующее доизвлечение потерянного в хвостах сепарации металла только увеличивает преимущество. Кроме того, получаемый более мелкий материал сокращает площади для крупного и частично для среднего дробления, а также сокращает необходимые площади обоганительной фабрики.

Реализация устойчивого экологически сбалансированного развития горно-добывающего комплекса зависит от рациональной взаимосвязи процессов добычи, первичной и вторичной переработки руды. Обогащение и металлургия эффективны при условии: количество руды, поступающей на переработку, не превышает резервов мощностей, предусмотренных для этих процессов.

Определение цены единицы готовой продукции производится на основе положения: расчетная стоимость металла равняется средней за 10 лет его биржевой цене. Периодичность изменения цен на металлы составляет 5–18 лет [21]. Условие устойчивого функционирования:  $C_p = C_{cp10}$ , где  $C_p$  — расчетная стоимость металла;  $C_{cp10}$  — средняя биржевая цена металла за 10 лет.

Подобным образом учитываются другие экономические ограничения на ресурсы: затраты на оплату труда, на амортизацию, на материальные и финансовые ресурсы.

Извлечение отдельных компонентов из комплексных руд в виде готовой продукции требует оценки снижения прибыльности предприятия в связи с затратами на их производство. Ранее принятые решения подлежат пересмотру в связи с разработкой и созданием новых технологий.

Предприятие не должно замыкаться на производстве традиционной продукции. Следует рассматривать возмож-

ность выпуска новых видов продукции с использованием технологий и оборудования, которые по своему характеру близки к существующим. Кроме того, положительный эффект на перспективу могут оказывать разведка других, непрофильных полезных ископаемых, а также местных — глин, гравия, песка, известняка, мергеля, природного камня, используемых в строительных целях; использование имеющейся техники для бурения на воду, проведение инженерных изысканий грунтов, гидрогеологических исследований и т.п.

При выполнении условий устойчивой работы предприятия, смысл принципов его экологически сбалансированного функционирования может быть выражен в виде:

$$\sum \mathcal{E}_d \leq \sum (\mathcal{E}_p + \mathcal{E}_o + \mathcal{E}_m),$$

где  $\sum \mathcal{E}_d$  — общая комплексная техногенная нагрузка на экосистему добывающего предприятия;  $\mathcal{E}_p$  — комплексная техногенная нагрузка от разработки месторождения;  $\mathcal{E}_o$  — комплексная техногенная нагрузка от обогащения сырья;  $\mathcal{E}_m$  — комплексная техногенная нагрузка от металлургического передела.

Реализация устойчивого развития с учетом экологических ограничений определяет изменения выбираемых и создаваемых геотехнологий:

- Малоотходные технологии с минимальным размещением на поверхности отвалов и хвостохранилищ, полностью нарушающих природу. Сведение к минимуму уничтожения растительности на занимаемых ими площадях; полный цикл комплексного освоения недр, предусматривающий подземное размещение отходов добычи и переработки.

- Развитие избирательной выемки, т.е. выдача на поверхность полезного ископаемого, ради добычи которого создается объект; широкое внедрение скважинного выщелачивания с поверхности и скважинной гидродобычи в соответ-

ствующих условиях; увеличение доли селективной выемки на месторождениях малой и средней мощности, залегающих в скальных породах.

- На стадии проектирования горных предприятий обоснование решений, минимизирующие негативное воздействие на экосистему в районе их расположения за весь период функционирования, а также приведение возникающих изменений в окружающей среде в соответствие с биологически допустимыми значениями.

- Разработка системы показателей: критериев, норм, правил создания горно-технических систем, обеспечивающих равновесие экосистем, учитывающих как разнообразие форм техногенного воздействия, так и разнообразие структуры нарушаемых экосистем.

В целях усиления роли экологического фактора в решении проблем устойчивого развития предлагается, наряду с показателем минимума денежных затрат, ввести второй (новый) критерий, позволяющий выбирать технологии с минимумом затрат экологических ресурсов — геотехнологии с минимальной «природоемкостью» [22].

## Заключение

Разработка и реализация принципов устойчивого экологически сбалансированного развития горных предприятий требует совокупного учета характеристик и взаимосвязи всех технологических процессов полного цикла комплексного освоения недр. Оптимизация отдельных подсистем не гарантирует наилучшего решения всей проблемы. Принятие рассматриваемых принципов при проектировании и практической деятельности на разных этапах добычи руд и технологических переделов до конечных продуктов является основой экономически выгодного, экологически чистого и социально ответственного горного предприятия.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Munoz J.L., Guzman R.R., Botin J.A.* Development of a methodology that integrates environmental and social attributes in the ore resource evaluation and mining planning // *International Journal of Mining and Mineral Engineering*. 2014. Vol. 5, no 1, pp. 38–58. DOI: 10.1504/IJMMME.2014.058918.
2. *Rahimi E., Ghasemzadeh H.* A new algorithm to determine optimum cut-off grades considering technical, economical, environmental and social aspects // *Resources Policy*, 2015. Vol. 46, no 1, pp. 51–63.
3. *Rahmanpour M., Osanloo M.* A decision support system for determination of a sustainable pit limit // *Journal of Cleaner Production*. 2016, Vol. 141, pp. 1249–1258. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.09.205.
4. *Xu X., Gu X., Wang G., Liu J., Wang J.* Ultimate pit optimization with ecological cost for open pit metal mines // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2014, Vol. 24, no 5, pp. 1531–1537. DOI: 10.1016/S1003-6326(14)63222-2.
5. *Moradi J., Osanloo M.* Prioritizing sustainable development criteria affecting open pit mine design: a mathematical model // *Procedia Earth and Planetary Science*. 2015, Vol. 15, pp. 813–820. DOI: 10.1016/j.proeps.2015.08.130.
6. *Obed O., Kenneth J., Albert K.M.* «Small in size, but dig in impact»: Socio-environmental reform for sustainable artisanal and small-scale mining // *Journal of Sustainable Mining*, 2019, Vol. 18, no 1, pp. 38–44.
7. *Sapna A.N., Muneer A.M., Anupriya D.* A sustainable livelihood framework to implement CSR project in coal mining sector // *Journal of Sustainable Mining*, 2017, Vol. 18, no 3, pp. 83–93.
8. *Francis X.D., Stephen D.K., Robert E.H.* Sustainable development in Ghana gold mines: clarifying the stakeholders perspective // *Journal of Sustainable Mining*, 2019, Vol. 18, no 2, pp. 77–84.
9. *Трубецной К.Н., Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В.* Принципы обоснования параметров устойчивого и экологически сбалансированного освоения месторождений твердых полезных ископаемых // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2014. – СВ 2. – С. 3–10.
10. *Каплунов Д.Р., Юков В.А.* Принципы устойчивого и экологически сбалансированного освоения недр на базе комбинированных геотехнологий // *Горный журнал*. – 2015. – № 11. – С. 32–36.
11. *Каплунов Д.Р., Юков В.А.* Геотехнология перехода от открытых к подземным горным работам. – М.: Изд-во «Горная книга», 2007. – 267 с.
12. *Емельянов В.Н., Лейзерович С.Г.* Экологически безопасная технология подземной добычи железистых кварцитов КМА // *Горный журнал*. – 1996. – № 1–2. – С. 67–69.
13. *Лейзерович С.Г., Помельников И.И., Сидорчук В.В., Томаев В.К.* Ресурсовоспроизводящая безотходная геотехнология комплексного освоения месторождений Курской магнитной аномалии. – М.: Изд-во «Горная книга», 2012. – 547 с.
14. *Волощук С.Н., Назаркин В.Н., Балдин А.В. и др.* Опыт применения системы разработки нисходящими слоями с твердеющей закладкой и использованием самоходного оборудования. – М.: Изд-во «Цветметинформация», 1974. – 83 с.
15. *Дриженко А.Г.* Восстановление земель при горных разработках. – М.: Наука, 1985. – 241 с.
16. *Абрамов В.Ф., Лушников В.И.* Опыт разработки месторождений подземным обогащением руды на зарубежных рудниках // *Цветная металлургия*. – 1984. – № 12. – С. 71–72.
17. *Шварц Ю.Д., Семигин Р.И., Зицер И.С., Кутузов Д.С.* Безотходное горно-обогательное производство на базе подземных комплексов // *Горный журнал*. – 1992. – № 9. – С. 20–23.

18. Каплунов Д.Р., Юков В.А. О классификации техногенных образований пустых пород и некондиционных руд при подземной разработке месторождений полезных ископаемых // Маркшейдерский вестник. — 2008. — № 1. — С. 21–24.
19. Кожиев Х.Х., Ломоносов Г.Г. Рудничные системы управления качеством минерального сырья. — М.: Изд-во МГГУ, 2008. — 292 с.
20. Лисиченко В.Г. Подготовка рудного сырья, Т. 2. — М., 2010. — 187 с.
21. Пешков А.А., Мацко Н.А. Доступность минерально-сырьевых ресурсов. — М.: Наука, 2004. — 260 с.
22. Трубецкой К.Н., Галченко Ю.П. Геоэкология освоения недр Земли и экогеотехнологии разработки месторождений. — М.: ООО «Научтехполитиздат», 2015. — 360 с. **ПЛАБ**

## REFERENCES

1. Munoz J.L., Guzman R.R., Botin J.A. Development of a methodology that integrates environmental and social attributes in the ore resource evaluation and mining planning. *International Journal of Mining and Mineral Engineering*. 2014. Vol. 5, no 1, pp. 38–58. DOI: 10.1504/IJME.2014.058918.
2. Rahimi E., Ghasemzadeh H. A new algorithm to determine optimum cut-off grades considering technical, economical, environmental and social aspects. *Resources Policy*, 2015. Vol. 46, no 1, pp. 51–63.
3. Rahmanpour M., Osanloo M. A decision support system for determination of a sustainable pit limit. *Journal of Cleaner Production*. 2016, Vol. 141, pp. 1249–1258. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.09.205.
4. Xu X., Gu X., Wang G., Liu J., Wang J. Ultimate pit optimization with ecological cost for open pit metal mines. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2014, Vol. 24, no 5, pp. 1531–1537. DOI: 10.1016/S1003-6326(14)63222-2.
5. Moradi J., Osanloo M. Prioritizing sustainable development criteria affecting open pit mine design: a mathematical model. *Procedia Earth and Planetary Science*. 2015, Vol. 15, pp. 813–820. DOI: 10.1016/j.proeps.2015.08.130.
6. Obed O., Kenneth J., Albert K.M. «Small in size, but dig in impact»: Socio-environmental reform for sustainable artisanal and small-scale mining. *Journal of Sustainable Mining*, 2019, Vol. 18, no 1, pp. 38–44.
7. Sapna A.N., Muneer A.M., Anupriya D. A sustainable livelihood framework to implement CSR project in coal mining sector. *Journal of Sustainable Mining*, 2017, Vol. 18, no 3, pp. 83–93.
8. Francis X.D., Stephen D.K., Robert E.H. Sustainable development in Ghana gold mines: clarifying the stakeholders perspective. *Journal of Sustainable Mining*, 2019, Vol. 18, no 2, pp. 77–84.
9. Trubetsnoy K.N., Kaplunov D.R., Ryl'nikova M.V. The principles of justification of parameters of sustainable and ecologically balanced development of solid mineral deposits. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2014. Special edition 2, pp. 3–10. [In Russ].
10. Kaplunov D.R., Yukov V.A. The principles of sustainable ecologically balanced exploitation of mineral resources based on combined geotechnologies. *Gornyy zhurnal*. 2015, no 11, pp. 32–36. [In Russ].
11. Kaplunov D.R., Yukov V.A. *Geotekhnologiya perekhoda ot otkrytykh k podzemnym gornym rabotam* [Geotechnology of the transition from open to underground mining], Moscow, Izd-vo «Gornaya kniga», 2007, 267 p.
12. Emel'yanov V.N., Leyzerovich S.G. Environmentally friendly technology of underground mining of ferruginous quartzite KMA. *Gornyy zhurnal*. 1996, no 1–2, pp. 67–69. [In Russ].
13. Leyzerovich S.G., Pomel'nikov I.I., Sidorchuk V.V., Tomaev V.K. *Resursovospriizvodnyashchaya bezotkhodnaya geotekhnologiya kompleksnogo osvoeniya mestorozhdeniy Kurskoy magnitnoy anomalii* [Resource-reproducing non-waste geotechnology for integrated

development of the Kursk magnetic anomaly deposits], Moscow, Izd-vo «Gornaya kniga», 2012, 547 p.

14. Voloshchuk S.N., Nazarkin V.N., Baldin A.V. *Opyt primeneniya sistemy razrabotki niskhodyashchimi sloyami s tverdeyushchey zakladkoy i ispol'zovaniem samokhodnogo oborudovaniya* [The experience of using a development system in descending layers with a hardening tab and the use of self-propelled equipment], Moscow, Izd-vo «Tsvetmetinformat-siya», 1974, 83 p.

15. Drizhenko A.G. *Vosstanovlenie zemel' pri gornyykh razrabotkakh* [Land restoration during mining], Moscow, Nauka, 1985, 241 p.

16. Abramov V.F., Lushnikov V.I. Experience in developing deposits by underground ore processing at foreign mines. *Tsvetnaya metallurgiya*. 1984, no 12, pp. 71–72. [In Russ].

17. Shvarts Yu.D., Semigin R.I., Zitser I.S., Kutuzov D.S. Waste-free mining and processing production on the basis of underground complexes. *Gornyy zhurnal*. 1992, no 9, pp. 20–23. [In Russ].

18. Kaplunov D.R., Yukov V.A. On the classification of man-made formations of empty rocks and substandard ores during underground mining of mineral deposits. *Marksheyderskiy vestnik*. 2008, no 1, pp. 21–24. [In Russ].

19. Kozhiev Kh.Kh., Lomonosov G.G. *Rudnichnye sistemy upravleniya kachestvom mineral'nogo syr'ya* [Mine quality management systems for minerals], Moscow, Izd-vo MGGU, 2008, 292 p.

20. Lisichenko V.G. *Podgotovka rudnogo syr'ya*, T. 2 [Preparation of ore raw materials, Vol. 2], Moscow, 2010, 187 p.

21. Peshkov A.A., Matsko N.A. *Dostupnost' mineral'no-syr'evykh resursov* [Availability of mineral resources], Moscow, Nauka, 2004, 260 p.

22. Trubetskoy K.N., Galchenko Yu.P. *Geoekologiya osvoeniya nedr Zemli i ekogeotekhnologii razrabotki mestorozhdeniy* [Geoecology of the development of the Earth's bowels and environmental geotechnology of field development], Moscow, OOO «Nauchtekhpolitizdat», 2015, 360 p. [In Russ].

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Каплунов Давид Родионович<sup>1</sup> – чл.-корр. РАН,  
главный научный сотрудник,

Юков Владимир Александрович<sup>1</sup> – канд. техн. наук,  
старший научный сотрудник,

<sup>1</sup> Институт проблем комплексного освоения недр РАН.

**Для контактов:** Каплунов Д.Р., e-mail: info@ipkonran.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

D.R. Kaplunov<sup>1</sup>, Corresponding Member  
of Russian Academy of Sciences, Chief Researcher,  
V.A. Yukov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher,

<sup>1</sup> Institute of Problems of Comprehensive Exploitation  
of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences,  
111020, Moscow, Russia.

**Corresponding author:** D.R. Kaplunov, e-mail: info@ipkonran.ru.

Получена редакцией 10.06.2019; получена после рецензии 27.01.2020; принята к печати 20.02.2020.

Received by the editors 10.06.2019; received after the review 27.01.2020; accepted for printing 20.02.2020.

