

# НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МОДУЛЬНОГО ПРИНЦИПА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГОРНТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ



**Д. Р. Каплунов,**  
зав. отделом,  
проф., чл.-корр. РАН  
УРАН ИПКОН РАН



**М. В. Рыльникова,**  
главный научный сотрудник,  
проф., д-р техн. наук  
УРАН ИПКОН РАН



**В. Н. Калмыков,**  
зав. кафедрой,  
проф., д-р техн. наук  
ГОУ ВПО «МГТУ им. Г. И. Носова»

Перспективной тенденцией развития теории проектирования горнотехнических систем является разработка типовых технологических и технических решений в виде законченных циклов технологических процессов и операций по осуществлению того или иного этапа (стадии) комплексного освоения участка недр (месторождения) — так называемых геотехнологических модулей, которые при соответствующей адаптации к конкретным условиям месторождений могут быть использованы при составлении различного рода проектов развития горных работ.

сырья в особых геомеханических и гидрологических условиях — с процессами гидродобычи, а в отдельных случаях (для отработки маломощных рудных тел и жил) — со специальными геотехнологиями извлечения рудного керна при бурении скважин большого диаметра обеспечивает наиболее полное вовлечение всех природных и техногенных георесурсов в эффективное промышленное освоение. Именно таким путем возможна реализация двух неотъемлемых положений — это безотходное (малоотходное) использование всех вовлекаемых в ходе освоения участка недр георесурсов и извлечение их рациональным сочетанием технологических процессов и оборудования при различных способах добычи с утилизацией отходов горно-металлургического производства в закладке выработанного пространства, использованием последних при рекультивации территорий, в промышленном и дорожном

недр. По сути дела, комбинированная геотехнология непосредственно основывается на модульном подходе как неотъемлемой части комплексного освоения недр.

Создание горнотехнических систем на базе комбинации традиционного открытого и подземного способов добычи с процессами физико-химической геотехнологии на основе кучного и подземного выщелачивания ценных компонентов из бедных руд и техногенного

**П**ринципиально новое значение модульный подход приобретает применительно к комбинированной геотехнологии, где различные модули, оптимизированные по заданным параметрам и взаимодействующие между собой с учетом эффекта эмерджентности, могут дать совершенно новое качество технологических решений с существенно более высокими показателями роста интенсивности, экономичности и экологичности освоения участка

строительстве, при создании горных объектов нового производственного назначения. Формирование горнотехнических систем на модульном принципе призвано решить указанные задачи.

Идея заключается в глубокой дифференциации основных и вспомогательных процессов комплексного освоения участка недр и таких увязке и совершенствовании геотехнологических модулей, которые обеспечивают при их рациональном сочетании во времени и пространстве существенное повышение эффективности освоения участка недр.

Основные признаки геотехнологического модуля — его относительная самостоятельность, замкнутость, цикличная повторяемость технологических процессов, направленность на выполнение конкретной и определенной функции. Геотехнологический модуль как элемент горнотехнической системы находится в непосредственной взаимосвязи с другими элементами (геотехнологическими модулями) и обладает всеми системными признаками. При необходимости он может быть изъят из горнотехнической системы, модернизирован, а в отдельных случаях — исключен либо заменен новым модулем, выполняющим аналогичные функции. Ключевым словом в понятии «модуль» традиционно является типизация — унификация технологических решений, возможность переносить их в другие горнотехнические системы. Геотехнологический модуль представляет собой функциональную единицу горнотехнической системы. Выделение геотехнологического модуля из горнотехнической системы для его модернизации, оптимизации параметров осуществляется при сохранении всех внешних и внутренних связей, представленных соответствующими уравнениями и системами ограничений. В соответствии с заданными внешними и внутренними условиями геотехнологические модули описываются определенными входными и выходными параметрами, обеспечивающими их

стыковку (связь) с другими модулями горнотехнической системы.

*Горнотехническая система* — это совокупность горных конструкций, технических и технологических подсистем открытых, подземных, физико-химических и специальных методов добычи во взаимодействии с вмещающими их участками недр. Геотехнологические модули или их сочетание (в зависимости от масштаба) обеспечивают выполнение какой-либо функции горнотехнической системы, а в совокупности — освоение участка недр Земли (месторождения). Геотехнологические модули различного иерархического уровня с неотделимыми связями, соединяясь входными параметрами со смежными модулями, формируют горнотехническую систему, параметры которой в наибольшей степени соответствуют горно-геологическим, геомеханическим и природно-климатическим условиям освоения участка недр. В зависимости от сложности горнотехнической системы иерархия горнотехнических модулей различна.

*Элементарным образующим модулем* является замкнутая, условно неделимая последовательность повторяющейся совокупности технологических процессов и операций, обеспечивающих выполнение характерного для данного объекта последовательного цикла работ с получением заданного технологического результата. Образующим геотехнологическим модулем является, например, цикл по проходке горно-капитальных и горно-подготовительных выработок; цикл по извлечению запасов полезного ископаемого в слое, прирезке, заходке, секции, камере и т. д.; цикл технологических процессов по закладке секции, слоя, камеры; совокупность технологических процессов по обеспечению заданного качества добываемого сырья в расчетном объеме добычи; совокупность технологических процессов по управлению состоянием массива в пределах извлекаемого участка месторождения; совокупность технологических процессов по транспортированию минерального сырья по

рудничным магистралям; совокупность технологических процессов по обеспечению требуемого количества воздуха на проходческий забой, выемочный участок, очистные выработки и т. д.; совокупность процессов по сбору подземных вод, исключаяющих подтопление участка, и т. д.

Совокупность образующих модулей формирует более крупные модули, такие, как модуль очистной выемки. Последний при физико-технической геотехнологии включает горную конструкцию с вмещающим ее участком недр, процессы подготовки полезного ископаемого к извлечению буровзрывным, механическим или гидравлическим способом, погрузку и выпуск рудной массы с последующим транспортированием до общерудничных транспортных коммуникаций. При физико-химической геотехнологии модуль очистной выемки включает горную конструкцию с вмещающим ее участком недр, процессы по подготовке массива, физико-химических воздействий, сбора продуктивных растворов и доставке их до общерудничной сети. Совокупность геотехнологических модулей подготовительно-нарезных работ и очистной выемки составляет основу системы разработки и технологической схемы рудника.

В соответствии с вышеизложенным система разработки — это совокупность основных и вспомогательных геотехнологических модулей, применяемых в определенных конструктивных решениях для добычи полезных ископаемых. Технологическая схема рудника представляет собой совокупность геотехнологических модулей очистных работ и транспорта полезного ископаемого, его складирования, размещения пород от вскрышных и проходческих работ.

Реализация геотехнологических модулей осуществляется в пределах определенной зоны, элементарного участка недр. Выбор элементарного выемочного участка зависит от принятого варианта системы разработки. Так, при системе разработки с обрушением руды элементарный вы-

емочный участок – это участок одновременно (условно с учетом интервала замедления при взрыве) обрушаемого массива; при системе разработки с открытым выработанным пространством – массив обрабатываемой камеры; при этажно-камерных системах разработки с последующим погашением целиков – компенсационная камера и обрушаемый на нее массив; при системах разработки с магазинированием руды – слой отбиваемой и выпускаемой в цикле руды; при слоевых системах разработки с закладкой выработанного пространства – слоевая выработка; при камерных системах разработки с закладкой выработанного пространства – обрабатываемая и в последующем заполняемая закладочным материалом камера.

Образующие (микромодули) могут быть объединены в модули более высокого порядка, сочетание которых, в свою очередь, формирует более сложные (макромодули), последние интегрируются в горнотехническую систему. Макромодули выполняют более крупные функции освоения месторождений: вскрытие месторождения или его участка, подготовка выемочного участка к эксплуатации, извлечение полезных ископаемых, управление состоянием массива, управление качеством потоков извлекаемого минерального сырья, складирование отходов, воспроизводство георесурсов и т. д. Они также выполняют вспомогательные функции: вентиляция, водоотлив, дорожное строительство, водо- и энергоснабжение, сигнализация, автоматизация и связь.

Реализация геотехнологических модулей предполагает изначальное научно-методическое обоснование их рационального состава, конструкции и оптимизацию параметров как основы комплексного проектирования горнотехнической системы.

По своему назначению все геотехнологические модули делятся на основные, вспомогательные, подсобные и побочные. Основные модули обеспечивают извлечение полезно-

го ископаемого сочетанием различных технологических процессов. Вспомогательные модули создают условия для эффективного функционирования основных модулей. Подсобные модули призваны решать вопросы материально-технического обеспечения основных и вспомогательных модулей (ВВ и запчасти для эффективного функционирования основных и вспомогательных модулей). В побочных геотехнологических модулях создается продукция и оказываются услуги дополнительно назначения.

Условием эффективной работы геотехнологических модулей является корректное определение входных и выходных параметров, в рамках которых оптимизируются их собственные характеристики. Входными и выходными параметрами модуля являются характеристики связи его с другими модулями, требования к результату целевого назначения модуля, включая объемные и массовые показатели производительности в единицу времени и качественные характеристики. Обеспечение этих показателей с максимальной эффективностью, интенсивностью и экологичностью осуществляется за счет оптимизации собственных внутренних параметров модуля. Этими параметрами являются качественные и количественные характеристики геотехнологического модуля, принципиально отличающие его от других и обеспечивающие выполнение присущей им целевой функции. Весьма важно определить такие функции и цели, которые не противоречили, а обеспечивали бы выполнение основной целевой функции горнотехнической системы в целом.

Качественные параметры геотехнологических модулей следующие:

- ◆ перечень и характеристики геотехнологических процессов;
- ◆ типоразмерный ряд применяемого оборудования с возможными пределами изменения основных характеристик;
- ◆ режим и параметры процессов.

Количественные параметры геотехнологического модуля определя-

ются по результатам геомеханического, физико-химического, геотермического, гидрологического, горнотехнического и технологического, а также эколого-экономического обоснования.

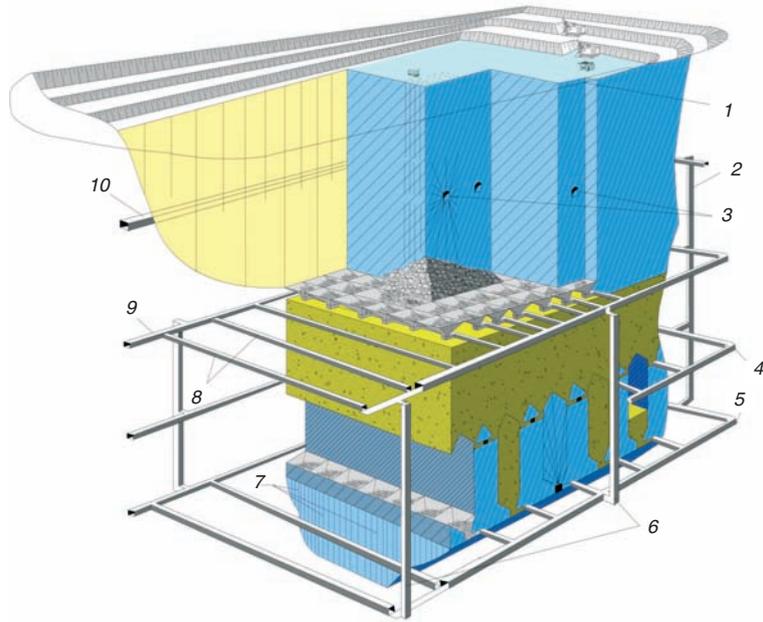
Приоритетной проблемой является установление взаимосвязей параметров и условий применения геотехнологических модулей в соответствии с принятой целевой функцией для их совершенствования, модернизации и создания новых модулей на основе принятия совокупности технических, организационных и экономико-экологических решений, обеспечивающих необходимые объемы и качественный состав добываемого сырья в современных и перспективных макроэкономических условиях производства и потребления минеральных ресурсов.

Модульный подход позволяет рационализировать горнотехническую систему и оптимизировать ее параметры, определить пути модернизации и, как результат, изменить конфигурацию и параметры всей горнотехнической системы в соответствии с целевыми функциями на основе совершенствования элементарного модуля. В отличие от системного подхода, предполагающего оптимизацию горнотехнической системы на основе единого критерия эффективности с учетом уравнений связи, описывающих состояние всех подсистем, модульный подход предполагает модернизацию и оптимизацию параметров отдельно взятых модулей. При системном подходе модель, описывающая состояние горнотехнической системы, является достаточно сложной и не позволяет рационализировать и оптимизировать параметры отдельных, более мелких составных элементов системы, принимая их как заданные. При модульном подходе работа с более простой моделью, описывающей геотехнологический модуль, является более оперативной, характеризуется простотой анализа результатов, меньшей вероятностью ошибки и позволяет определить наилучшие результаты по каждому модулю, со-

вокупность которых и обеспечивает повышение эффективности всей системы. При этом одним из основных вопросов является определение целевой функции геотехнологического модуля, соответствующей целевой функции всей горнотехнической системы.

Важно отметить, что модульный подход к рационализации горнотехнических систем и оптимизации их параметров не исключает системного подхода, а предполагает его как обязательное условие определения входных параметров. На основе системного подхода определяются основные параметры стратегии формирования и развития горнотехнической системы, которые закладываются в целевую функцию и входные параметры геотехнологических модулей, устанавливаются уравнения связи и системы ограничений, в соответствии с которыми осуществляются совершенствование и оптимизация параметров отдельно взятых геотехнологических модулей. Такой принципиально новый модульный подход с формированием рациональной горнотехнической системы дал возможность разработать и реализовать применительно к условиям разработки месторождений медноколчеданных руд Учалинского ГОКа комбинированную физико-техническую и физико-химическую геотехнологии комплексного освоения месторождений многокомпонентных руд и сопутствующих техногенных образований в замкнутом геотехнологическом цикле. Горнотехническая система предусматривает сочетание геотехнологических модулей открытой и подземной добычи, обогащения кондиционных руд, кучного и подземного выщелачивания бедных руд и техногенного сырья, гидрометаллургии с утилизацией конечных отходов при закладке выработанного пространства.

Способ комплексного освоения месторождений полиметаллических руд (рис. 1, 2) предусматривает извлечение балансовых запасов месторождения геотехнологическими модулями открытой добычи руд по сис-



**Рис. 1. Построенная по модульному принципу горнотехническая система с последовательной обработкой запасов открытого, открыто-подземного, подземного и скважинного ярусов:**

1 — дно карьера; 2 — вентиляционно-ходовой восстающий; 3 — выработки бурового горизонта в ОПЯ; 4 — кольцевые штреки верхнего и нижнего горизонта шахты; 5 — откаточный горизонт; 6 — рудоспуски; 7 — горизонт скважинного выщелачивания; 8 — вентиляционно-закладочные орты; 9 — кольцевой штрек в основании ОПЯ; 10 — подэтажный штрек ОПЯ

темам разработки с внешним отвалообразованием и подземной добычи по системам разработки с твердеющей закладкой выработанного пространства. Самостоятельными геотехнологическими модулями представлены: комплекс подземного выщелачивания некондиционных руд и комплекс кучного выщелачивания в карьере, на поверхности и в подземных камерах предварительно окомкованных текущих либо лежалых, ранее заскладированных в хвостохранилище отходов обогащения. На единой промплощадке проектом предусматривается также размещение геотехнологических модулей: обезвоживания и окомкования хвостов обогащения, приготовления твердеющей закладочной смеси из отходов выщелачивания и гидрометаллургической переработки продуктивных растворов, получаемых в ходе реализации процессов физико-химической геотехнологии. В качестве активных агентов выщелачивания используются модифицированные отвальные стоки, которые характеризуются

кислой реакцией среды и достаточно высокой минерализацией. Попутное извлечение металлов из промышленных вод в процессах выщелачивания позволяет получать дополнительную товарную продукцию и обеспечивает очистку стоков перед сбросом их в окружающую среду.

Исследованиями доказана возможность использования с максимальным эффектом всего ресурсного потенциала недр — кондиционных руд и отходов: некондиционных руд, сопутствующих нерудных полезных ископаемых, промежуточных продуктов, текущих хвостов обогащения, техногенных образований прошлых лет, подземного пространства. При этом сочетание процессов и оборудования физико-технических и физико-химических геотехнологий в едином технологическом пространстве обеспечивает объединение в единую горнотехническую систему различных геотехнологических модулей, которые дополняют и усиливают действие друг друга.



Рис. 2. Схема горнотехнической системы комбинированной физико-технической и физико-химической геотехнологий комплексного освоения рудных месторождений

Таким образом, *геотехнологический модуль* – это совокупность технологических процессов с соответствующими комплексами горного оборудования и горных выработок, находящихся во взаимодействии с участком недр и обеспечивающих выполнение законченного цикла определенного вида работ по освоению месторождения, взаимно увязанных по своим параметрам с другими модулями горнотехнической системы.

Последовательность проектирования горнотехнических систем модульного типа представляется следующей:

- ♦ на осваиваемом участке недр, представленном одним или группой месторождений и сопутствующих техногенных образований, разработка которых ведется по взаимосвязанному и взаимозависимому технологическому решению, либо на отдельно взятом месторождении полезных ископаемых выделяются участки со сходными горно-геологическими, горнотехническими, геомеханическими, газогидрологическими и геохимическими условиями;

- ♦ в электронной базе данных подбирается перечень возможных к применению в данных условиях типовых геотехнологических модулей. В базе данных содержатся сведения по составу, условиям применения геотехнологического модуля,

диапазону изменения технико-экономических и экологических показателей, зависящему от условий реализации модуля и вариации составляющих модулей в горнотехнической системе;

- ♦ на основе перечня отобранных на предыдущем этапе модулей осуществляется построение возможных вариантов архитектуры горнотехнической системы;

- ♦ на основе данных технического задания на проектирование и геотехнологического моделирования оптимизацией основных показателей функционирования отобранных для сравнения горнотехнических систем осуществляется выбор рационального варианта и определяются параметры горнотехнической стратегии;

- ♦ выполняется дифференциация горнотехнической системы с выделением основных и вспомогательных

модулей различного уровня, установлением элементарных геотехнологических модулей и элементарных выемочных участков;

- ♦ устанавливаются входные и выходные параметры модуля, уравнения связи с другими модулями и системы ограничений, целевая функция, определяются пути совершенствования и модернизации отдельных геотехнологических модулей, оценивается возможность замены отдельных модулей на новые, выполняющие те же функции, но с более высоким эффектом;

- ♦ в соответствии с разработанными геотехнологическими моделями на основе выбранной целевой функции осуществляются оптимизация параметров геотехнологических модулей и соединение их между собой и в целом в горнотехническую систему комплексного освоения участка недр;

- ♦ выполняется оценка показателей совокупного эффекта от эксплуатации сформированной горнотехнической системы, включая показатели интенсивности освоения участка недр, качество извлечения запасов, экологические и экономические критерии;

- ♦ на основе сравнения полученных показателей с требованиями лицензионного соглашения, технического задания и базовыми показателями геотехнологической стратегии освоения участка недр осуществляются анализ полученных результатов, выявление «узких мест», корректировка параметров отдельных модулей с последующим оформлением всей проектной документации. ■■■

#### Rationale of the modular principle of mining engineering system design

*D. R. Kaplunov, M. V. Rynnikova, V. N. Kalmykov*

The authors present the rationale of the modular principle of mining engineering system design including the development of standard technological and engineering solutions as completed cycles of processes and operations aimed at the implementation of one or another stage of site (deposit) development. The article describes the route of modular mining engineering system design as a case study for copper-pyrite deposits operated by the Uchalinsky GOK.

Key words: mining engineering systems, design, modular principle, optimization of parameters.