

УДК 622.271:622.68 + 622.233/235

**МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ  
ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ГЛУБОКИХ КАРЬЕРОВ**

**В. Л. Яковлев, А. В. Глебов, А. Г. Журавлев, С. Н. Жариков, Е. С. Шимкив**

*Институт горного дела УрО РАН, E-mail: yakovlev@igduran.ru,  
ул. Мамина-Сибиряка, 58, 620075, г. Екатеринбург, Россия*

Изложен методологический подход к формированию горнотехнических систем глубоких карьеров, основанный на учете переходных процессов. Параметры и показатели подсистем горнотехнической системы и их элементы имеют большое количество взаимосвязей и претерпевают изменения в течение срока существования карьера. Их формирование рассматривается как совокупность периодов стабильного функционирования и переходных процессов. Описана терминологическая парадигма структуры, элементов и параметров горнотехнической системы карьера в приложении к карьерному транспорту. Приведена концепция адаптации технологической и технической подсистем при переходных процессах как механизм обеспечения оптимального уровня функционирования горнотехнической системы. Проиллюстрирован механизм обеспечения их динамического равновесия. Показаны элементы оптимизации параметров транспортной системы карьера как одного из наиболее затратных процессов при добыче полезных ископаемых открытым способом, основанные на применении комплексного компьютерного моделирования: геометрического, процессно-имитационного и экономико-математического. Описаны ключевые особенности учета устойчивости бортов карьера при обосновании параметров горнотехнической системы. Приведен подход к оптимизации параметров взрывной подготовки горной массы к выемке, основанный на оперативном уточнении физико-механических свойств пород и данных о горном массиве.

*Горнотехническая система, карьер, переходный процесс, адаптация, карьерный транспорт, буровзрывные работы, устойчивость бортов карьера*

DOI: 10.15372/FTPRPI20240610

EDN: ODJAJM

Специфика освоения глубокозалегающих сложноструктурных месторождений твердых полезных ископаемых состоит в том, что их разработка продолжается десятки лет, как правило, начинается с открытой геотехнологии в условиях непрерывного роста глубины рабочей зоны карьера, нарастанием геологической, горнотехнической и технологической информации, требующей безусловного выделения этапов формирования карьерного пространства, изменения параметров систем разработки, формирования транспортной системы карьера путем примене-

---

Исследование выполнено в рамках государственного задания № 075-00412-22 ПР. Методологические основы стратегии комплексного освоения запасов месторождений твердых полезных ископаемых в динамике развития горнотехнических систем (FUWE-2022-0005, № 1021062010531-8-1.5.1).

ния новых видов транспорта и т. д., т. е. пересмотра большинства принятых проектных решений, уточнения глубины карьера и перехода к подземной или комбинированной разработке месторождения [1].

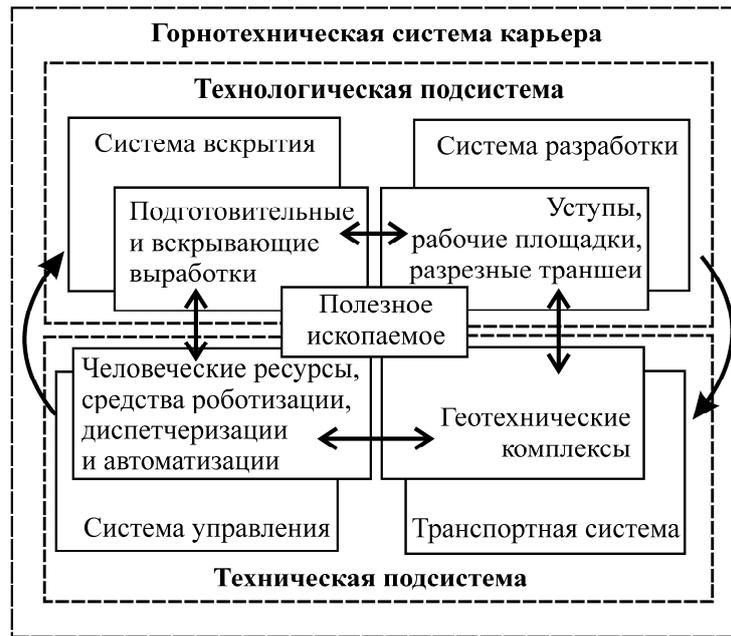
Актуальным направлением в исследовании является системный подход, обеспечивающий комплексный учет многообразия подсистем, элементов и факторов, обеспечивающих формирование и развитие горнотехнической системы. Важный аспект — обеспечение устойчивого развития этой системы с достижением заданных показателей эффективности и безопасности [2–4]. Комплексная оптимизация горнотехнических систем, повышение их эффективности и решение технологических вопросов требуется для широкого спектра технологических объектов — не только крупных, но также имеющих ряд особенностей и ограничений [5].

Необходимость развития подхода к формированию горнотехнических систем с применением парадигмы переходных процессов обусловлена тем, что по мере развития горных работ в карьере, уточнения горно-геологических условий, фактических технологических и технико-экономических показателей требуется соответствующая адаптация системы и ее элементов [1, 6–8]. При этом особое значение имеют: установление схемы взаимодействия элементов системы, их влияние на осуществление переходных процессов, определение индикаторов и критериев эффективности процессов добычи и переработки полезного ископаемого, а также обоснование соответствующих методик контроля параметров и адаптации.

ИГД УрО РАН на протяжении ряда лет в своих исследованиях уделяет внимание обозначенной выше тематике. Результаты исследований реализуются в конкретных прикладных разработках, основанных на детальном изучении переходных процессов, а также позволяют сформулировать концепцию комплексного подхода к развитию горнотехнической системы, которой является горнодобывающее предприятие по освоению месторождения полезных ископаемых. В настоящей статье отражены основные аспекты такого подхода.

Общепринятые определения горнотехнической системы включают в свой состав технологическую подсистему транспортирования. Данное определение не позволяет с достаточной полнотой исследовать процесс накопления технических, технологических и других несоответствий транспортной системы условиям ее функционирования при увеличении глубины карьера, приводящей к росту затрат. Предлагается выделять две взаимосвязанные подсистемы горнотехнической системы: технологическую и техническую (рис. 1). Технологическая подсистема горнотехнической системы карьера — совокупность элементов подготовительных, вскрышных и добычных выработок, обеспечивающих доступ к георесурсам, и размещение геотехнических комплексов с целью их извлечения [9]. Техническая подсистема горнотехнической системы карьера — цепь взаимосвязанных геотехнических комплексов, осуществляющих контролируемый и управляемый людьми процесс перемещения горной массы во времени и пространстве. В данном исследовании технической подсистемой является автомобильно-конвейерный транспорт (АКТ).

Между технологической и технической подсистемами горнотехнической системы карьера существует количественная связь, выраженная через производительность карьера, скорость подвигания фронта работ, скорость понижения горных работ и провозную способность транспортных коммуникаций. Оптимальность этих показателей достигается обеспечением взаимного соответствия параметров технологической и технической подсистем, т. е. их взаимной адаптацией. Соответствующая концепция приведена на рис. 2. Она позволяет отработать карьер до конечной глубины, например с использованием автомобильно-конвейерного транспорта, не превышая уровень допустимых затрат, в отличие от сложившейся практики, когда без адаптации автомобильно-конвейерный транспорт практически исчерпывает свою эффективность на глубине карьера 350–400 м.



↔ Связи взаимозависимых подсистем ГТС карьера  
 ↔ Связи взаимодействующих элементов технологической и технической подсистем



Рис. 1. Рассматриваемая терминологическая парадигма структуры, элементов и параметров горнотехнической системы карьера в приложении к карьерному транспорту

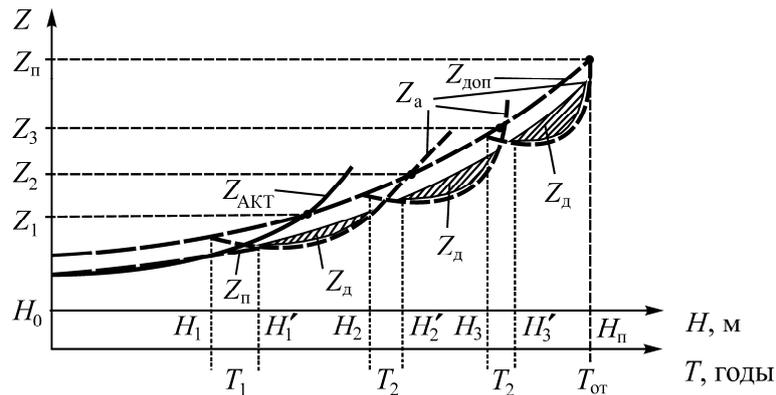


Рис. 2. Концепция достижения подсистемами горнотехнической системы динамического равновесия:  $Z_п, H_п, T_{от}$  — проектные значения затрат, глубины и срока отработки карьера;  $Z_1, Z_2, Z_3$  — затраты на транспортирование горной массы, превышение которых приемлемо для субъекта;  $H_1, H_2, H_3$  — глубина карьера, соответствующая началу адаптационных мероприятий;  $H_1', H_2', H_3'$  — глубина карьера, соответствующая окончанию адаптационных мероприятий;  $T_1, T_2, T_3$  — периоды восстановления стабильности процесса транспортирования;  $Z_д$  — зоны динамического равновесия технологической и технической подсистем АКТ;  $Z_а$  — затраты на достижение динамического равновесия технологической и технической подсистем АКТ;  $Z_{доп}$  — допустимый уровень затрат на транспортирование горной массы

Устойчивое состояние транспортной системы карьера, при котором соблюдается сбалансированность технологической и технической подсистем горнотехнической системы, находящейся под воздействием внутренних и внешних факторов в течение длительного времени, есть не что иное, как динамическое равновесие этих подсистем. Суть принципа динамического равновесия — заблаговременная взаимная адаптация технологической и технической подсистем горнотехнической системы для исключения отклонения рассматриваемых показателей сверх допустимого проектного уровня. Такое представление горнотехнической системы карьера позволяет работать с ней как с динамичной системой, состояние которой меняется во времени при реализации технических, технологических и организационных инноваций, и обеспечивать достижение требуемого уровня эффективности. Для оценки динамического равновесия подсистем горнотехнической системы в качестве критериев целесообразно использовать сбалансированность процессов производственной системы и минимум допустимых затрат на транспортирование горной массы. Сбалансированность отражает взаимосоответствие развития производственных процессов, т. е. такое сочетание их параметров и состояний, которое способствует получению оптимальных результатов.

Адаптация подсистем выполняется в ходе переходного процесса, причем выделяются два аспекта: планирование переходного процесса и его осуществление. Содержательно переходные процессы, как и адаптация, подразделяются на структурные (изменение структуры и/или порядка взаимодействия элементов горнотехнической системы) и параметрические (подстройка параметров системы под изменяющиеся условия).

Установлено, что:

- выбор рационального порядка осуществления переходного процесса рационально выполнять с учетом его динамики и результирующих прогнозных технико-экономических показателей в пределах периода его осуществления;

- адаптацию технической и технологической подсистем необходимо выполнять не менее чем на период устойчивого (относительно устойчивого) состояния горнотехнической системы между структурными или крупными параметрическими переходными процессами с учетом их влияния на оптимизацию горнотехнической системы в целом;

- оптимизация горнотехнической системы должна осуществляться комплексно на всем жизненном цикле карьера: характер, параметры, результаты ее функционирования в периоды стабильности и переходных процессов должны учитываться интегрально за весь период существования.

Характерная задача адаптации технологической и технической подсистем горнотехнической системы — развитие транспортной системы карьера в ответ на изменяющиеся (усложняющиеся) горно-технологические условия по мере отработки месторождения. Ведущей тенденцией является увеличение глубины карьера, влекущее рост высоты подъема и расстояния транспортирования, которые предопределяют заметное падение производительности транспортных единиц и существенное удорожание процесса транспортирования горной массы.

Транспорт неразрывно связан с другими процессами открытых горных работ напрямую или опосредованно: взрывная подготовка пород к выемке влияет на производительность погрузочно-разгрузочных работ, износ элементов транспорта; способ погрузки влияет как на выбор типа и размера транспорта, так и на его производительность и износ; схема как внутрикарьерной, так и фабричной рудоподготовки и рудопереработки также влияет на выбор типоразмера транспорта, схему и организацию его работы. В системном плане наиболее тесно связан транспорт с параметрами карьера — через параметры вскрывающих выработок.

Исследования показали, что для карьеров глубиной более 270–350 м затраты на транспортирование горной массы из рабочей зоны карьера на поверхность достигают 45–50 % от полных затрат на добычу полезного ископаемого, а при большей глубине превышают этот показатель. Взаимная адаптация параметров горных выработок и параметров карьерного транспорта и соответствующая оптимизация горнотехнической системы в целом обеспечивают основной эффект, позволяя достичь наиболее полного и экономичного освоения месторождения.

Разработаны следующие адаптационные мероприятия, которые могут применяться в зависимости от горно-геологических и сезонно-климатических условий месторождения:

- рациональное формирование транспортной системы карьера во взаимосвязи “затраты на транспортирование – дополнительные затраты на вскрышу (определяемые формой вскрывающих выработок)”;

- трансформация схемы вскрытия по мере углубки карьера как по глубине, так и по этапам разработки, в том числе с переходом на комбинированный транспорт;

- применение зон с экстремальными по устойчивости (в том числе временной) параметрами уступов и бортов карьеров вместе с роботизированными комплексами оборудования для ведения горных работ;

- специальные схемы вскрытия (тоннельное, крутонаклонными съездами и др.);

- применение совмещенных элементов системы разработки (например, совмещение берм очистки с полутраншеями транспортных берм для автомобильного или конвейерного транспорта);

- использование специализированного самоходного безрельсового транспорта (самосвалы для крутонаклонных съездов, аккумуляторные самосвалы, дизель-троллейбусы и др.);

- применение специальных видов транспорта (канатные подъемники, крутонаклонные конвейеры, подъемники на базе кабельных кранов и др.).

Решение задач по оценке результатов и динамики осуществления переходных процессов при формировании транспортной системы карьера должно осуществляться с учетом большого количества факторов и показателей, что требует применения большого количества расчетов. При отсутствии полного объема знаний о внутренних взаимосвязях, ввиду сложности их аналитического описания, а также присутствующей неполноты данных о горном массиве месторождения, поиск оптимума возможен только методом вариантов (при этом методы направленного поиска решений могут применяться по отдельным достоверно изученным элементам). Отбор вариантов необходимо осуществлять с помощью известных методов [10, 11] либо применять специфические подходы, адаптированные к условиям месторождения [1, 7, 8]. Для этого подходит комплекс методов компьютерного моделирования:

- геометрического (моделирование рудных тел, горных выработок и т. п. [12, 13]);
- процессно-имитационного (моделирование функционирования технологической и/или технической подсистем горнотехнической системы, например карьерного транспорта [8, 14, 15]);
- экономико-математического (установление закономерностей технико-экономических показателей от горно-технологических и технических факторов, выявление предпочтительных условий применения тех или иных технологических решений, видов транспорта, конкретных модификаций машин и т. п. [11, 16]).

Имитационное моделирование позволяет учесть не только горнотехнические факторы, например по методике [17], но и организационно-технологические. На рис. 3 приведена параметрическая адаптация функционирования технической подсистемы — погрузочно-транспортного оборудования в карьере, выполненная по результатам имитационного моделирования.

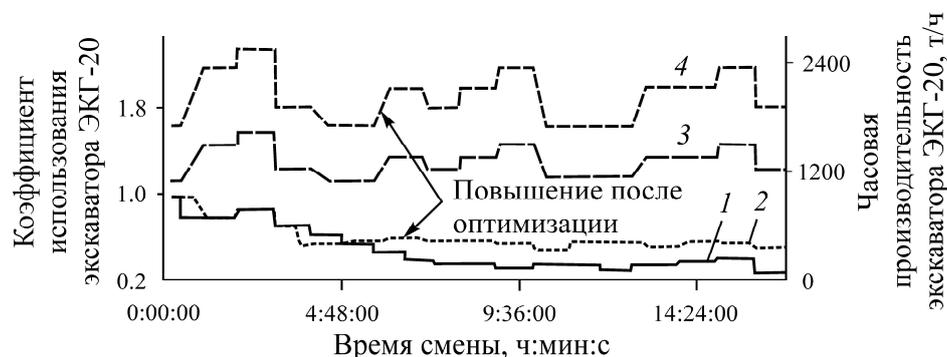


Рис. 3. Оптимизация работы карьерного транспорта с использованием имитационного моделирования: 1 — среднечасовой коэффициент использования; 2 — то же после оптимизации; 3 — среднечасовая производительность; 4 — то же после оптимизации

По мере понижения горных выработок усложняется организация работы экскаваторов в забоях и разминровка автосамосвалов в рабочей зоне, наблюдается скопление их в очередях на погрузку. Методом вариантов установлено такое расположение экскаваторных забоев, их типоразмер и правила распределения автосамосвалов по экскаваторам, которое при сохранении заданного объема выемки горной массы обеспечивает повышение коэффициентов использования оборудования, что в конечном итоге снижает потребный парк как экскаваторов, так и автосамосвалов. Аналогичным образом может быть выполнена структурно-параметрическая адаптация — изменена схема расположения вскрывающих выработок в нижней части карьера, обеспечивающая повышение пропускной способности системы транспортных коммуникаций.

Важный аспект исследований при обосновании рациональных параметров горнотехнической системы карьера — обеспечение устойчивости уступов и групп уступов, особенно в зонах расположения транспортных берм, а также бортов в целом. Обоснованные геомеханическими расчетами параметры устойчивости откосов влияют на конструкцию бортов карьера как в конечном контуре, так и в промежуточных контурах.

Разработка месторождений полезных ископаемых на больших глубинах влечет за собой ухудшение геомеханических условий обеспечения устойчивости карьерных откосов, связанное с увеличением действующих в массиве напряжений [18–20]. Исследование тектонических напряжений на устойчивость прибортовых массивов вызывает необходимость разработки методик изучения и обоснования устойчивости бортов и уступов карьеров, в том числе с применением численного моделирования напряженно-деформированного состояния массива горных пород [21–26]. Многолетний опыт исследований ИГД УрО РАН устойчивости уступов и бортов карьеров в гравитационно-тектоническом поле напряжений позволил определить ряд особенностей, изложенных ниже.

По мере формирования выработанного пространства карьера наблюдается постоянная трансформация тектонического поля напряжений. Изменение направления и уровня тектонических напряжений во времени вызывает ослабление структурных связей в массиве, что при неблагоприятно ориентированной трещиноватости проявляется в виде обрушения локальных участков борта и образования зависаний и периодических вывалов крупных фрагментов массива.

Возникновение оползневых процессов и формирование поверхностей скольжения происходит в результате неупругого деформирования отдельных участков массива. Следствие тектонической подвижности массива — выделение оползневой призмы после объединения существующих и вновь образовавшихся дефектов массива в поверхность или зону скольжения с последующим перемещением оползня в направлении выработанного пространства карьера под воздействием гравитации.

После релаксации тектонических напряжений структурное строение массива существенно отличается от того, что было до их воздействия. Сдвиговые деформации сокращают не только поверхность соприкосновения висячего и лежащего крыльев трещин и нарушений, но и вызывают снижение прочностных свойств по контактам. Разуплотненный массив оказывается насыщенным разноориентированными трещинами, генерированными тектоническими напряжениями. В спектре тектонических дислокаций наибольшую опасность развития оползневых деформаций представляют пологопадающие поверхности ослабления, возникшие на первой стадии тектонической дезинтеграции, и крутопадающие структуры с падением в сторону поверхности обнажения, возникшие в конце тектонического этапа деформирования.

Главными факторами в оценке устойчивости бортов карьеров являются напряженное состояние массива, его нарушенность различными по ориентации и генезису дизъюнктивами и геометрические параметры борта. Основной метод выявления потенциально опасных участков — организация инструментальных наблюдений за подвижностью прибортовых массивов и периодических обследований берм и откосов уступов для обнаружения закольных трещин и зависаний приоткосных участков массива на фоне неблагоприятно ориентированных протяженных трещин. В [27] определены факторы, влияющие на устойчивость уступов и бортов карьеров, а также состав, объем и методика инженерно-геологических исследований и порядок расчетов устойчивости бортов и уступов карьеров. Для повышения надежности обоснования устойчивости и прогнозирования опасных деформаций уступов и бортов карьеров в скальных массивах предлагается учитывать дополнительные факторы (изменение напряженно-деформированного состояния

и подвижности прибортовых массивов), что подразумевает проведение дополнительных исследований на действующих глубоких карьерах (мониторинг подвижности массива, выявление индикаторов тектонических движений, оценка уровня и направления действия тектонических напряжений, расчеты устойчивости откосов с учетом тектонических напряжений [28]).

При планировании переходных процессов в развитии горнотехнической системы карьера необходимо обязательно учитывать обеспечение устойчивости прибортовых массивов:

- на этапе планирования и разработки проекта — на основе изысканий, обследований и расчетов;
- при производстве горных работ — на основе мониторинга, корректировки принятых технологических и строительных решений в соответствии с изменениями структуры и прочностных свойств массива;
- в районах расположения капитальных вскрывающих выработок, транспортных коммуникаций — уделять внимание долговременной устойчивости элементов системы разработки;
- в случае этапности разработки глубокозалегающих месторождений и формировании временно нерабочих бортов — периодически адаптировать параметры уступов и участков бортов к изменяющимся условиям их формирования.

Неотрывно связан с технологией разработки месторождения процесс подготовки горной массы к выемке. Он влияет на способ ее выемки и погрузки в транспорт, транспортирование, процессы дробления на переделе обогащения при выборе как способов и типов технических средств, их параметров, так и показателей их работы (производительность, износ, затраты и т. п.). Буровзрывные работы также неотрывно связаны с обеспечением устойчивости горной выработки. Очевидно, что они являются важным элементом при обосновании динамики осуществления переходных процессов.

В большинстве случаев подготовка горной массы к выемке осуществляется буровзрывным способом (БВР), параметры и организация которого претерпевают за период разработки месторождения существенные изменения. В ИГД УрО РАН обоснованы основные направления технологического развития БВР для некоторых крупных карьеров Уральского региона и Сибири. Исследования позволили определить сущность учета переходных процессов в БВР и установить структуру связей между ними и систематизировать факторы, их предопределяющие [29]. Последнее является основополагающим для организации селективной выемки и многокомпонентного извлечения полезных ископаемых из руд в перспективе. Описываемая структура представлена в виде схемы на рис. 4.

В отечественной и зарубежной литературе отмечается поиск вариантов лучшего управления энергией взрыва как при оптимизации параметров взрыва, его воздействию на массив и разлет кусков [30–32], так и при повышении эффективности бурения взрывных скважин [33–35]; ряд работ посвящен учету показателей бурения взрывных скважин для планирования взрывов [36]. Однако, как правило, описываемые подходы не характеризуются комплексностью во взаимосвязи с другими процессами добычи полезного ископаемого.

Оптимизация БВР при планировании и осуществлении переходных процессов в развитии горнотехнической системы подразумевает несколько аспектов:

- обоснованный выбор параметров, технических средств БВР и организации при конструировании горнотехнической системы;
- адаптация БВР к изменяющимся условиям ведения горных работ по мере формирования и развития горнотехнической системы;
- адаптация БВР к изменению макроэкономической обстановки (переориентация на альтернативные технические средства, сокращение издержек и т. п.).

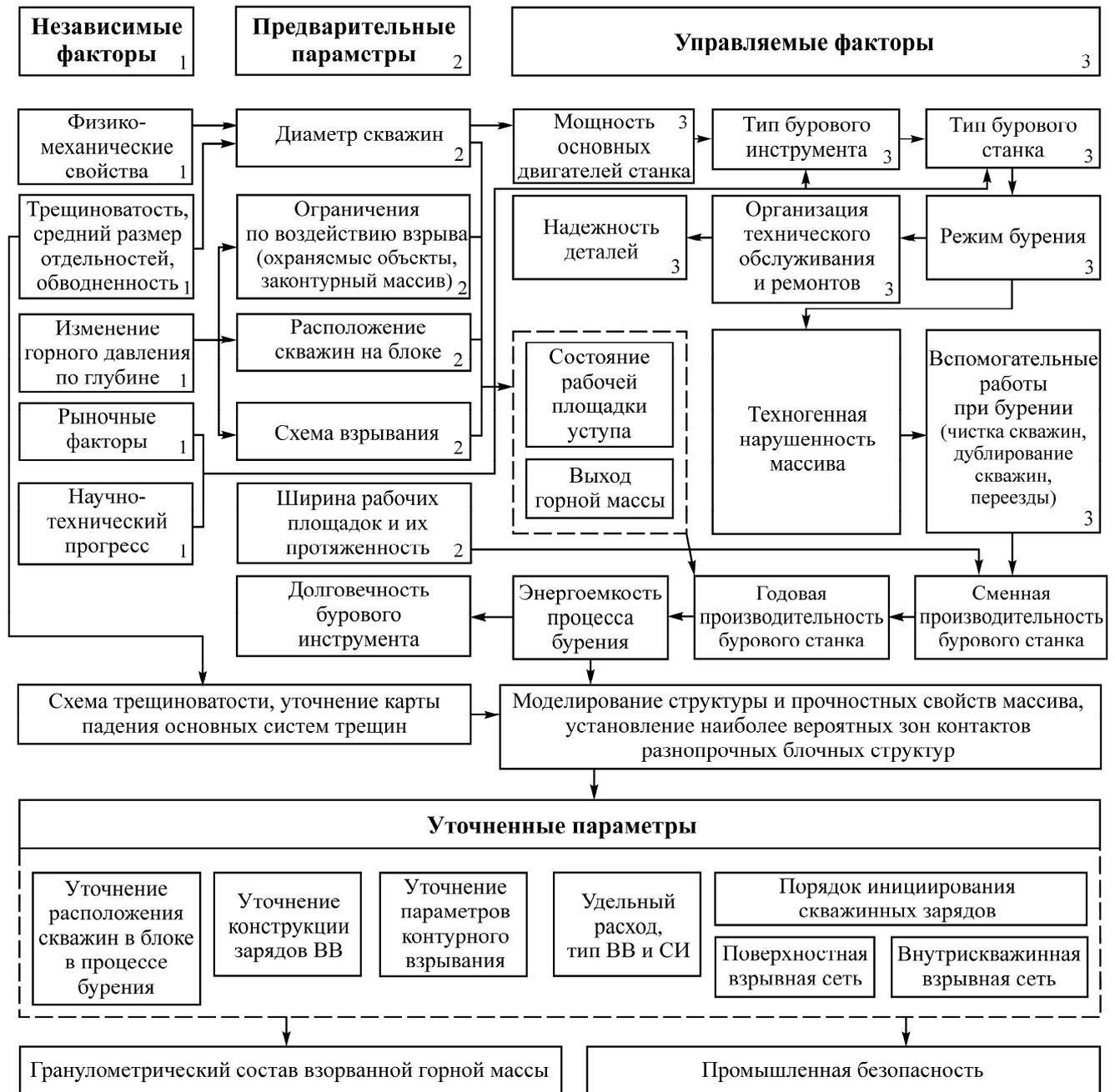


Рис. 4. Систематизация основных факторов, предопределяющих необходимость осуществления переходных процессов при БВР с учетом получения детального представления о свойствах массива в естественном залегании: 1, 2, 3 — отнесение элементов схемы соответственно к независимым факторам, предварительным параметрам и управляемым факторам

Первые два аспекта затрагивают системные вопросы в параметрах и структуре БВР и вписываются в схему рис. 4. Третий аспект подразумевает корректировку действия второстепенных экономических факторов при условии обязательного сохранения основных технологических параметров и показателей. Опыт показывает, что принудительная оптимизация затрат сопровождается экономикой предприятия с периодичностью 10–14 лет.

Оптимизации затрат при существующей технологии отбойки буровзрывных работ можно добиться при сокращении расхода взрывчатого вещества и уменьшении затрат на буровой инструмент, избегая необоснованного их снижения, поскольку это приведет к ухудшению качества подготавливаемой к выемке горной массы с соответствующим ростом затрат по смежным процессам горных работ (экскавация, транспорт, дробление). Адаптация параметров БВР возможна при получении данных о параметрах разрушающего воздействия и свойствах массива горных пород с применением современных информационных технологий, в частности учета данных бурения взрывных скважин. Исследования в этом направлении обусловлены следующими аспектами:

1) оперативное определение буримости, взрываемости, трещиноватости пород при соответствующей оценке доверительной вероятности в зависимости от точности, характеризующейся как сложностью массива, так и методами определения; построение на их основе карт массива по классификационным признакам и их оперативное уточнение;

2) учет структурных особенностей массива пород при определении параметров его взрывного разрушения и организации работ;

3) критерии и прикладные зависимости для корректировки параметров взрывного разрушения пород по данным о физико-механических свойствах массива, трещиноватости, полученным при бурении взрывных скважин;

4) критерии и прикладные зависимости для определения параметров БВР при взрывании в приконтурной зоне и формировании отрезных щелей.

Это позволит наилучшим образом адаптировать БВР к условиям разработки месторождения с одновременным разумным сокращением затрат на процессы при условии согласованности критериев эффективности между процессами добычи и переработки полезных ископаемых.

## **ВЫВОДЫ**

Исследование переходных процессов, установление причин их возникновения, понимание сущности происходящих изменений и закономерностей их развития в конкретных горно-геологических и горнотехнических условиях — основа создания стратегии управления этими процессами при проектировании и в течение всего срока освоения запасов минерального сырья глубокозалегающих сложноструктурных месторождений. В структурном виде новые подходы сводятся к совокупному применению программно-целевых методов, основанных на принципах системности, комплексности, междисциплинарности исследований и их инновационной направленности. Непременный аспект осуществления переходных процессов — адаптация структуры и параметров горнотехнической системы к изменяющимся условиям в динамике развития горных работ, а именно изменение внешних показателей системы в целом и внутренняя взаимная адаптация ее элементов. Взаимная адаптация элементов горнотехнической системы — реакция на изменение внешних и внутренних факторов, выражается в тенденции установления приемлемого уровня функционирования, обеспечивающего динамическое равновесие параметров и показателей элементов, а также достижение требуемого уровня эффективности.

Установлены рациональные контуры оптимизации горнотехнических систем на разных уровнях: переходного процесса (в пределах периода его осуществления); взаимной адаптации технической и технологической подсистем (не менее чем на период устойчивого или относительно устойчивого состояния горно-технической системы между структурными или крупны-

ми параметрическими переходными процессами); оптимизации горнотехнической системы в целом (комплексно на всем жизненном цикле карьера). Поиск оптимума, ввиду сложности полного описания всех взаимосвязей системы, рационально выполнять методом вариантов на основе компьютерного моделирования. Данный подход применим для структурной и параметрической адаптации. При планировании переходных процессов в развитии горнотехнической системы карьера необходимо учитывать обеспечение устойчивости горной выработки с учетом длительности этапов разработки и самих переходных процессов. Инструмент этого — комплексный мониторинг состояния массива, бортов карьера и их элементов.

Определены основные подходы и принципы к адаптации параметров БВР в изменяющихся условиях разработки сложно-структурных месторождений твердых полезных ископаемых: оперативное уточнение свойств разрабатываемого массива; снижение затрат за счет использования этой информации при установлении рациональной разрушающей нагрузки на локальном участке. При недостаточной определенности технического развития предприятия многофакторная адаптация процессов под существующие условия весьма актуальна и перспективна в связи с широким развитием в будущем селективной выемки и многокомпонентного извлечения металлов из руд. При проектировании, планировании и реализации переходных процессов необходимо обязательно учитывать совокупность взаимосвязей технологических процессов добычи полезных ископаемых, подходить комплексно к их взаимной оптимизации и обеспечению высокого уровня функционирования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Яковлев В. Л.** Исследование переходных процессов — новое направление в развитии методологии комплексного освоения георесурсов. — Екатеринбург: УрО РАН, 2019. — 284 с.
2. **Каплунов Д. Р., Федотенко В. С.** Устойчивое развитие горнотехнических систем как переход от добычи полезных ископаемых к освоению георесурсов и сохранению недр // Горн. журн. — 2021. — № 8. — С. 4–7.
3. **Каплунов Д. Р., Рыльникова М. В.** Развитие научно-методических основ устойчивости функционирования горнотехнических систем в условиях внедрения нового технологического уклада // Изв. ТулГУ. Науки о Земле. — 2021. — № 4. — С. 24–39.
4. **Бурмистров К. В., Гавришев С. Е., Осинцев Н. А., Пыталев И. А.** Выбор стратегии устойчивого развития горнотехнической системы методом МАВАС1 // Изв. ТулГУ. Науки о Земле. — 2021. — № 4. — С. 268–283.
5. **Акишев А. Н., Бондаренко И. Ф., Зырянов И. В.** Технологические аспекты разработки беднотварных месторождений алмазов. — Новосибирск: Наука, 2018. — 368 с.
6. **Глебов А. В.** Концепция методологии взаимной адаптации автомобильно-конвейерного транспорта и развивающейся горнотехнической системы карьера // Горн. пром-сть. — 2022. — № 1S. — С. 78–85.
7. **Яковлев В. Л., Глебов А. В., Журавлев А. Г.** Переходные процессы при формировании транспортных систем карьеров // Рациональное освоение недр. — 2019. — № 1. — С. 54–59.
8. **Журавлев А. Г.** Вопросы оптимизации параметров транспортных систем карьеров // ГИАБ. — 2020. — № 3-1. — С. 583–601.
9. **Соколовский А. В.** Методология проектирования технологического развития действующих карьеров: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук. — М.: НИОГР, 2009. — 332 с.

10. **Валуев А. М.** Задача Парето-оптимизации траектории на сети как метамодель многокритериального выбора проектных решений для горных предприятий // ГИАБ. — 2015. — № 11. — С. 215–223.
11. **Бурмистров К. В., Осинцев Н. А., Рахмангулов А. Н., Юсупов М. Э.** Многокритериальный анализ стратегий устойчивого развития глубоких карьеров // Изв. ТомПУ. Инжиниринг георесурсов. — 2023. — № 12. — Т. 334. — С. 76–96.
12. **Наговицын О. В.** Развитие горно-геологической информационной системы в современных реалиях российской горнодобывающей отрасли // Горн. пром-сть. — 2023. — № 5S. — С. 35–40.
13. **Морозова Т. П.** Перспективы применения в горной промышленности российских систем цифрового проектирования: ГИС “ГЕОМИКС” и MINEFRAME // Инновации и инвестиции. — 2022. — № 5. — С. 132–135.
14. **Camargo L. F. R., Henrique L., Pacheco D., and Sartori F.** A method for integrated process simulation in the mining industry, *European J. Operational Res.*, 2018, Vol. 264, No. 3. — P. 1116–1129.
15. **Белгородцев О. В., Гурин К. П.** Оптимизация организации производственных процессов на основе разработки автоматизированного планировщика подземных горных работ // ГИАБ. — 2019. — № S37. — С. 51–59.
16. **Nehring M., Knights P. F., Kizil M. S., and Hay E.** A comparison of strategic mine planning approaches for in-pit crushing and conveying, and truck/shovel systems, *Int. J. Min. Sci. Technol.*, 2018, No. 28. — P. 205–214.
17. **Лель Ю. И., Арефьев С. А., Дунаев С. А., Глебов И. А.** Развитие идей член-корр. РАН В. Л. Яковлева по учету влияния горнотехнических условий эксплуатации на показатели карьерного автотранспорта // Проблемы недропользования. — 2014. — № 3 (3). — С. 136–144.
18. **Xie H., Li C., Gao M., Zhang R., Gao F., and Zhu J.** Conceptualization and preliminary research on deep in situ rock mechanics, *Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao Chinese, J. Rock Mech. Eng.*, 2021, Vol. 40, No. 2. — P. 217–232.
19. **Wojtecki Ł., Konicek P., Mendecki M. J., Golda I., and Zuberek W. M.** Geophysical evaluation of effectiveness of blasting for roof caving during longwall mining of coal seam, *Pure Applied Geoph.*, 2020, Vol. 177, No. 2. — P. 905–917.
20. **Kozyrev A. A., Panin V. I., Semenova I. E., and Zhuravleva O. G.** Geodynamic safety of mining operations under rockburst-hazardous conditions in the Khibiny apatite deposits, *J. Min. Sci.*, 2018, Vol. 54, No. 5. — P. 734–743.
21. **Lianheng Z., Dongliang H., Shuaihao Z., Xiao C., Yibo L., and Min D.** A new method for constructing finite difference model of soil-rock mixture slope and its stability analysis, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2021, Vol. 138. — P. 138–104.
22. **Duran M., Godoy E., Catafau E. R., and Toledo P. A.** Open-pit slope design using a DtN-FEM: Parameter space exploration, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2022, Vol. 149. — P. 104–110.
23. **Рыбин В. В.** Развитие теории геомеханического обоснования рациональных конструкций бортов карьеров в скальных тектонически напряженных породах: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук. — Апатиты, 2016. — 41 с.
24. **Неверов А. А., Неверов С. А., Тапсиев А. П., Щукин С. А., Васичев С. Ю.** Обоснование геотехнологий выемки рудных месторождений на основе развития модельных представлений об изменении параметров природного поля напряжений // ФТПРПИ. — 2019. — № 4. — С. 74–89.
25. **Семенова И. Э., Аветисян И. М.** Развитие концепции геомеханического обоснования горных работ в удароопасных условиях // Горн. журн. — 2022. — № 1. — С. 28–33.
26. **Семенова И. Э., Аветисян И. М.** Прогнозная оценка устойчивости борта карьера в тектонически напряженном массиве // Горн. пром-сть. — 2023. — № 5S. — С. 93–99.

27. **Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов.** Утв. Приказом Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору 13.11.2020 № 439. — М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2021. — 62 с.
28. **Яковлев В. Л., Яковлев А. В., Шимкив Е. С.** Методические основы обеспечения устойчивости уступов и участков бортов карьеров // ФТПРПИ. — 2023. — № 6. — С. 3–12.
29. **Жариков С. Н., Реготунов А. С., Кутуев В. А.** Современные научные исследования лаборатории разрушения горных пород ИГД УрО РАН и перспективы их развития // Проблемы недропользования. — 2022. — № 3 (34). — С. 73–90.
30. **Amiri M., Hasanipanah M., and Bakhshandeh A. H.** Predicting ground vibration induced by rock blasting using a novel hybrid of neural network and itemset mining, *Neural Computing Applications*, 2020, Vol. 32. — P. 14681–14699.
31. **Armaghani D. J., Mahdiyari A., Hasanipanah M., Faradonbeh R. S., Khandelwal M., and Amnieh H. B.** Risk assessment and prediction of flyrock distance by combined multiple regression analysis and Monte Carlo simulation of quarry blasting, *Rock Mech. Rock Eng.*, 2016, Vol. 49, No. 9. — P. 3631–3641.
32. **Armaghani D. J., Kumar D., Samui P., Hasanipanah M., and Roy B.** A novel approach for forecasting of ground vibrations resulting from blasting: modified particle swarm optimization coupled extreme learning machine, *Eng. Computers*, 2021, Vol. 37, No. 4. — P. 3221–3235.
33. **Sakiz U., Kaya G. U., and Yarali O.** Prediction of drilling rate index from rock strength and cerchar abrasivity index properties using fuzzy inference system, *Arabian J. Geosciences*, 2021, Vol. 14, No. 5.
34. **Krúpa V., Krul'áková M., Lazarová E., Labaš M., Feriančíková K., and Ivaničová L.** Measurement, modeling and prediction of penetration depth in rotary drilling of rocks, *Measurement*, 2018, Vol. 117. — P. 165–175.
35. **Hong-li Wang, Wei Bao, Xian-tang Zhang, and Tai-hui Xu.** Study on prediction of rotary-impact drilling speed of rock drill, *Advances in Engineering, Int. Conf. Manufacturing Eng. Intelligent Materials (ICMEIM 2017)*, 2017, Vol. 100. — P. 201–206.
36. **Ишейский В. А., Васильев А. С.** Ключевые особенности и проблемы при обработке, анализе и интерпретации данных по процессу бурения взрывных скважин // ГИАБ. — 2022. — № 3. — С. 16–33.

*Поступила в редакцию 07/III 2024  
После доработки 25/III 2024  
Принята к публикации 08/XI 2024*