

УДК 622.271.3 + 622.833.5.001.8

Методические основы технологии эффективного и безопасного освоения глубоких горизонтов месторождений полезных ископаемых открытым способом

А.А. Козырев¹, В.В. Рыбин¹, Д.В. Жиров², А.Л. Билин¹,
А.Н. Виноградов³, Э.В. Каспарьян¹, Ю.А. Виноградов³, И.Э. Семёнова¹,
А.М. Жирова²

¹ Горный институт КНЦ РАН

² Геологический институт КНЦ РАН

³ Кольский региональный сейсмологический центр Геофизической службы РАН

Аннотация. По результатам исследований предложены методические основы технологии эффективного и безопасного освоения глубоких горизонтов месторождений полезных ископаемых открытым способом. Методика реализуется путём поэтапного построения сейсмических, инженерно-геологических и геомеханических моделей массива пород в иерархическом ряду от рассматриваемой области верхней части земной коры до конкретного участка карьера. Методика предполагает организацию системы комплексного мониторинга устойчивости элементов открытой системы разработки с использованием систем контроля, адекватных масштабу рассматриваемых участков массива пород.

Abstract. As a result of integrated investigations new methodical fundamentals of effective and safe technology for open pit mining of deep levels of deposits have been developed. The method is arranged by stage-by-stage designing of seismic, geological engineering and geotechnical models in the scale of ranks from upper crust to single unit of mine. For achievement of this technology it is necessary to build up the complex monitoring system for inspection stability of construction units of open pit mining. The monitoring systems have to be appropriate to scales of investigations and objects.

Ключевые слова: разработка месторождений полезных ископаемых открытым способом, устойчивость бортов карьеров, напряжённое состояние, сейсмология, инженерная геология, геомеханика, мониторинг устойчивости бортов карьеров

Key words: surface mining, slope stability, stress state, seismology, engineering geology, geomechanics, slope stability monitoring

1. Введение

Для современного горнопромышленного комплекса России и всего мира в целом характерен переход к отработке глубоких горизонтов крупных месторождений в освоенных горнорудных районах. Это всегда сопровождается трудным поиском наиболее рационального и эффективного решения, так как освоение этих горизонтов сопровождается ухудшением горнотехнических условий отработки (действием более высоких напряжений в нетронутым массиве и изменением деформационно-прочностных свойств пород) и снижением экономических показателей предприятия. Для большинства рудников карьеры спроектированы с большим запасом прочности конструкции, и поэтому увеличение глубины отработки влечёт за собой значительный рост объёмов вскрышных работ за счёт разноски бортов при действующих нормативных значениях их среднего угла наклона. Если в дальнейшем предполагается переход на подземный способ добычи, то это также требует значительных капитальных затрат в течение длительного срока. Альтернативой этому может служить увеличение углов наклона бортов карьеров в конечном положении.

Принятые методы оценки устойчивости откосов уступов и бортов карьеров базируются, главным образом, на положениях механики грунтов и в своё время были разработаны в основном для относительно неглубоких карьеров в условиях массивов, представленных рыхлыми или непрочными осадочными породами. Распространение таких методов и подходов на скальные породы приводит к избыточному запасу в расчётах конструкций бортов и уступов, поскольку при этом не учитываются специфические особенности этих массивов, такие как заведомо высокие прочностные свойства и напряжённое состояние.

В то же время практика ведения горных работ в скальных массивах показывает, что устойчивость откосов, достигающих по высоте десятков и даже сотен метров, сохраняется в течение многих лет даже при крутых, вплоть до вертикальных, углах. Можно привести многочисленные

примеры: карьер Flintkote Mine (Канада), борт которого отстроен в гранитах под углом 70°; Cleveland Cliffs (США), борт которого при высоте 120 м отстроен под углом 80°; Westfrob Mine (Канада) глубиной 244 м с общим углом наклона борта 55°; Palabora (ЮАР), на котором реализованы генеральные углы откосов бортов до 58° с использованием вертикальных откосов уступов высотой 30 м; Sandsloot (ЮАР) с бортами высотой 300 м и углом наклона 58°; Aitik (Швеция), на котором, несмотря на достаточно сложные горно-геологические условия массива, угол откоса борта достигает 51°; Panda (Канада) имеет общий угол наклона бортов 50° при их высоте 315 м (Brawner, 1986; Bye et al., 1999; Slope..., 2001). Вновь проектируемые рудники, например, карьер Cu-Ni-PGE месторождения Keivitsa в северной Финляндии, также закладывают углы наклона более 50°. Есть примеры строительства достаточно крутых бортов карьеров и в России. Так, на карьере "Айхал" (Якутия) углы откосов бортов в глубокой части карьера составляют 70-80°, на Целиноградском горно-химическом комбинате один из участков борта карьера высотой 120 м был отстроен под углом 55° (Галустьян, 1996).

С другой стороны, на многих рудниках известны факты самообрушения отдельных участков бортов, которые существенно осложняют открытые горные работы, а в некоторых случаях обуславливают большие потери полезного ископаемого, наносят экономический ущерб предприятию и даже могут сопровождаться человеческими жертвами. Вследствие этого формирование бортов карьеров с крутыми откосами должно сопровождаться геомеханическим обоснованием, адекватным соответствующим горно-геологическим условиям, а именно: свойствам и состоянию массива пород.

2. Основы методологии

В наших исследованиях геомеханическое пространство рудника рассматривается как сложная, многокомпонентная и иерархически организованная природно-техническая система. При этом карьер занимает лишь промежуточное положение в масштабной линейке её компонентов, подпадая одновременно под влияние как надранговых, так и иерархически подчиненных факторов. Размеры и форма карьера зависят от геологического строения рудного тела и вмещающих пород, их физических свойств, тектоники и напряжённо-деформированного состояния (НДС) массива пород. При этом технологические элементы, составляющие карьер, такие как: отдельные уступы, борт в целом, рабочие горизонты и др., – в значительной мере изменяют свойства и состояние исходной природной среды, что в свою очередь оказывает обратное влияние на их (технологических элементов) устойчивость. Таким образом, решение задачи обеспечения устойчивости борта карьера диктует необходимость комплексного, междисциплинарно-интегрированного и разномасштабного подхода (рис. 1).

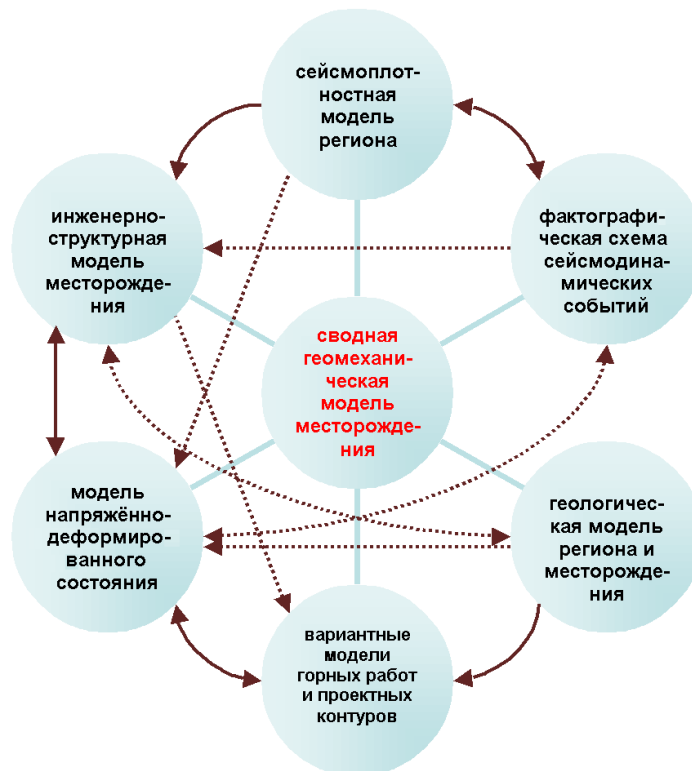


Рис. 1. Компонентно-организационная диаграмма комплекса исследований

Для каждой работы из технологической цепочки проводятся мероприятия и исследования, направленные на сбор, обобщение и анализ исходных данных и параметров всей системы и её иерархически организованных компонент.

С целью изучения глубинного строения региона – района деятельности рудников проводится сбор данных всех сейсмических исследований МОВ (метод отраженных волн) и ГСЗ (глубинное сейсмозондирование) с дальнейшей их обработкой, компиляцией и форматированием для сейсмотомографического моделирования. Так, например, по району, включающему крупнейшие в мире щелочные массивы Хибины и Ловозерские тундры, сформирован банк данных, содержащий свыше 600 сейсмических лучей региональных данных ГСЗ (профильные и площадные исследования) и более 2500 сейсмических лучей МОВ (рис. 2). Разнородность и различие качества исходных сейсмических данных, собранных ретроспективно по работам различных периодов, потребовали существенного усложнения методики изучения скоростных характеристик и явились основанием для разработки особой технологии интерпретации сейсмических материалов (рис. 3). Её алгоритм строится из следующей последовательности операций (Глазнев, Жирова, 2007):

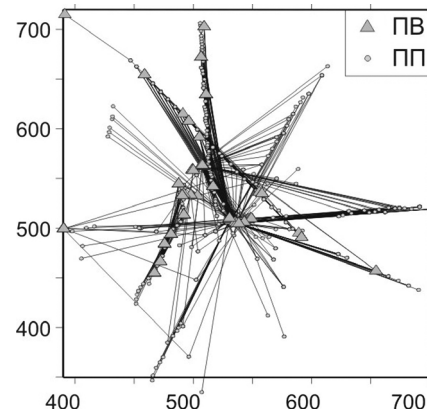


Рис. 2. Схема проекций лучей сейсмических волн на дневную поверхность

- Многоступенчатый анализ волнового поля, включающий: идентификацию сейсмических волн на основе решения прямых задач сейсмометрии в 1D варианте; дисперсионный анализ; изучение влияния зоны малых скоростей (ЗМС) и сложного рельефа региона.
- Обобщение и анализ петрофизических свойств, выявление их особенностей; построение начальных моделей скорости; установление корреляционных зависимостей между скоростью продольных волн и плотностью пород.
- Изучение скоростных характеристик в приповерхностной части среды на этапе малоглубинного моделирования для задания граничных условий, налагаемых на модель на основном этапе моделирования.
- Построение объёмных сейсмотомографических моделей на основном этапе моделирования в рамках решения обратной комплексной задачи с использованием всех отобранных сейсмических данных и граничных условий.
- Тестовые исследования с целью определения оптимальных параметров алгоритма решения сейсмотомографической задачи, специфики регуляризации в комплексной задаче, а также оценки разрешения построенных моделей.
- Построение объёмных скоростных моделей в рамках комплексного моделирования.

Важнейшими исследованиями, отражающими региональный вклад тектоники в НДС верхней части коры, являются сейсмологические работы: регистрация, компиляция (в т.ч. и палео землетрясений), анализ и прогноз сейсмической активности. С этой целью организована интегрированная сеть сейсмического и инфразвукового мониторинга динамических событий, состоящая из 7 трёхкомпонентных станций с аналоговой системой регистрации, 9 сейсмометров и 3 микробарометров. При этом сейсмический мониторинг имеет минимум двухуровневую структуру: региональный масштаб и масштаб рудника (его составных частей). Примером многоуровневой системы мониторинга служит природно-техногенная система (ПТС) "Хибины". Изучение сейсмичности северной

Рис. 3. Блок-схема технологии изучения скоростных характеристик интрузивных массивов

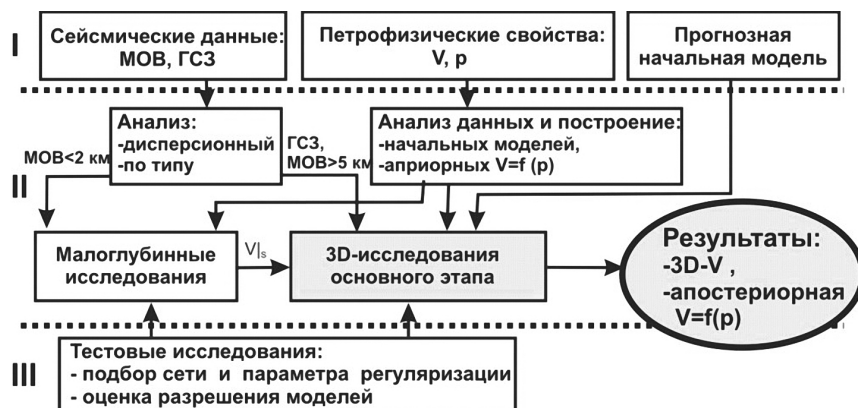
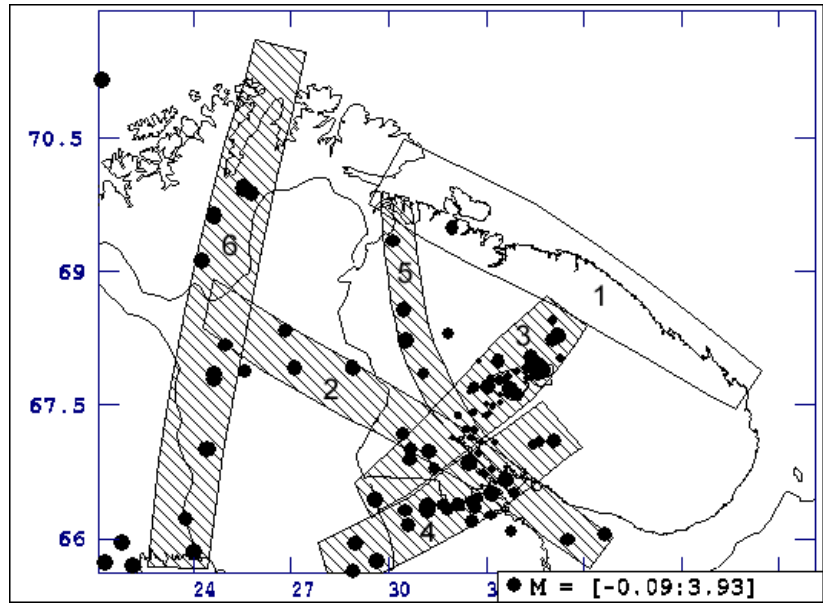


Рис. 4. Схема главных сейсмогенных зон и узлов северной части Фенноскандинавского щита (по данным цифрового мониторинга 1992-2005 гг.): (Адушкин и др., 2007)

- 1 – Финнмаркско-Мурманская (пассивная на данном отрезке времени)
- 2 – Кандалакшская
- 3 – Хибинско-Ловозерская
- 4 – Куусамо-Порьегубская
- 5 – Кандалакшско-Варангерская
- 6 – Ботний-Финнмаркская



части Фенноскандинавского щита и сопредельных территорий шельфа проводятся на базе Кольского филиала Геофизической службы РАН, а регистрация динамических событий в геомеханическом пространстве рудников на базе эксплуатирующихся апатит-нефелиновых месторождений организована недропользователем – ОАО "Апатит".

Для исключения техногенных событий при сейсмических исследованиях на региональном уровне применяется метод "обобщенных огибающих". Его суть в следующем: на основании анализа более 5000 заведомо известных для региона событий выделены 4 группы с совпадающими формами огибающих регистрируемых сигналов (подземный взрыв, наземный взрыв, воздушный взрыв, землетрясение). Это позволяет сравнивать наблюдаемые события с выделенными 4 типовыми формами огибающих и по результатам сопоставления классифицировать все явления в соответствии с этими формами огибающих. Таким образом удастся избирательно различать природную и техногенную составляющие сейсмической активности. Первая из них группируется в сейсмогенные зоны и узлы (рис. 4), имеющие унаследованный характер минимум на протяжении нескольких тысяч – десятков тысяч лет, и обуславливает естественный "фон" динамических событий со своими закономерностями и режимом. А вторая группа увязывается с местами значительной техногенной активности и коррелируется с интенсивностью горных работ. При этом обе перечисленные группы могут взаимно усиливаться при пространственном совмещении или приближении друг к другу. Такое положение вещей диктует необходимость постоянного избирательного мониторинга за динамическими событиями как техногенного, так и природно-тектонического характеров, а также анализа их взаимообусловленности, влияния и тенденций развития.

Структурные и инженерно-геологические исследования района работ и массива пород месторождения проводятся многоступенчато, последовательно уточняя и детализируя ключевые элементы и факторы на каждом из последующих этапов. На подготовительной стадии работ осуществляется выделение и анализ крупнейших (надранговых по отношению к месторождению / руднику) геолого-структурных элементов посредством дешифрирования аэро- и космо-фотоснимков (АФС и КФС), а также их сопоставления с геологическими картами разных масштабов и результатами геолого-геофизического изучения объекта исследований. Каждый из выделенных линеаментов и геоморфологических маркеров верифицируется на соответствие прямым (геологические границы и соотношения, результаты буровых и геофизических работ) и косвенным (особенности орографии) признакам. Это позволяет осуществить разбраковку элементов тектоники по надёжности и достоверности выделения. Следующий этап – анализ геологического строения месторождения и его составных частей (рудных тел, зональности, выявленных разрывных нарушений и т.д.). В результате определяются основные структурные элементы и литотипы (группы пород, характеризующиеся сходными физико-механическими свойствами и инженерно-геологическими условиями), по которым в первом приближении проводится районирование массива пород месторождения / карьера. При этом прослеживаются и увязываются в единую иерархически соподчиненную тектоническую схему разномасштабные геолого-структурные элементы и факторы, выявленные по результатам первого и второго этапов.

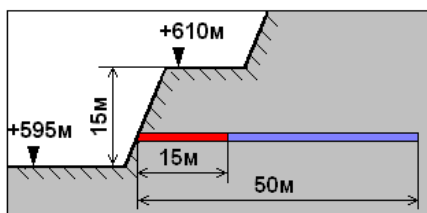


Рис. 5. Типовая конструкция станции по измерению параметров напряжённо-деформированного состояния породного массива методом разгрузки: общая длина скважины – 50 м, участок измерений методом разгрузки – 15 м

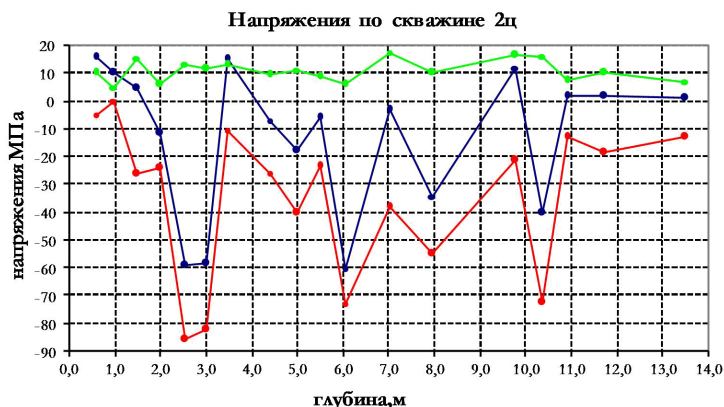


Рис. 6. Распределение напряжений по длине исследовательской скважины; верхний, средний и нижний графики – соответственно, распределение максимальной касательной, минимальной и максимальной компонент квазиглавных напряжений по длине участка измерений в скважине

Большая роль отводится детальным натурным исследованиям трещиноватости и других структурных неоднородностей массива пород непосредственно в уступах карьера, а также обследованию керна инженерно-геологических и других типов скважин. С целью обеспечения максимальной информативности используется методика многопараметрической документации и анализа. Для каждого структурного элемента с нарушением первичной сплошности массива пород, в том числе: разлом, дизъюнктивное нарушение, трещина, дайка и жильное образование, а также линзо-, дайко- или пластообразное геологическое тело постмагматической и/или пострудной стадии внедрения, – документируются (включая моду, среднее и размах) азимутальные характеристики и их изменчивость по простиранию и падению, линейные параметры в горизонтальной и вертикальной составляющей, нормальная мощность трещин и жил, характер их выполнения и минерализации, расстояние по нормали до смежных трещин в одной системе, а также кинематические признаки смещений и/или деформаций. Кроме того, структурные элементы ранжируются по размеру / масштабу проявления, а показатели их формы, геологические и структурные взаимоотношения (между собой и в комплексе) и многие другие параметры индексируются. Такой комплекс позволяет весьма тонко дифференцировать конвергентные и дивергентные системы трещиноватости и осуществлять их избирательную обработку и анализ вне зависимости от закономерных и спорадических факторов изменчивости азимутальных и частотных характеристик. Необходимо подчеркнуть, что изменчивость параметров трещиноватости является весьма характерной чертой массивов пород, но особенно ярко выражается в интрузивах центрального типа, таких как Хибины, Ловозеро, Ковдор и др. (Пожиленко и др., 2002). В случае широкого проявления разнообразных и многостадийных эндогенных и экзогенных процессов предоставляется возможность проведения ретроспективной (от молодых к древним) реконструкции основных тектонических событий, опираясь на представление о том, что минералообразование в жилах, трещинах и других нарушениях первоначальной сплошности имеет регрессивный характер, т.е. меняется от высокотемпературных гидротермальных минералов на ранних стадиях к низкотемпературным и гипергенным на поздних (Жиров и др., 2008). Результаты реконструкции хрупких разрушений и парагенетического анализа соответствующих тектонофизических условий позволяют определить главные тенденции и направленность эволюции динамических явлений и НДС массива пород в постмагматическую стадию развития месторождения. При этом наибольшая точность построений достигается в отношении наиболее близких к современности событий, что и требуется для разрабатываемой технологии. Полученные таким образом структурные и инженерно-геологические данные служат основой для геомеханических расчётов и построения моделей различной детальности и наполнения.

Завершающим блоком технологического комплекса работ по получению исходных данных для моделирования с оценкой устойчивости бортов карьеров являются геомеханические исследования. В свою очередь они подразделяются на проводимые "in situ" и расчётно-аналитические. Непосредственно в карьере проводятся инструментальные измерения действующих в массиве пород напряжений методом разгрузки в варианте торцевых измерений (рис. 5-6).

Сравнение расчётных по литостатическому давлению и измеренных величин максимальных главных напряжений в массиве показывает, что, как правило, в Кольском регионе фактические значения напряжений превышают максимальные расчётные по гравитационной составляющей за счёт вышележащих

пород. То есть присутствует значимая тектоническая компонента напряжений, для объяснения природы и закономерностей которой необходим анализ и увязка результатов сейсмологических, сейсмотомографических и структурно-геологических исследований регионального и детального масштабов.

Связывающим и интегрирующим все мультидисциплинарные исследования методическим стержнем является модельный подход, предусматривающий построение последовательно детализирующихся и усложняющихся моделей.

На первом этапе разрабатываются сейсмотомографическая и сейсмотектоническая модели. Их использование совместно с результатами различных детальных исследований позволяет обосновать инженерно-геологическую модель месторождения, которая, в свою очередь, может состоять из ряда частных моделей, например:

- моделей структурных нарушений различного порядка, включая трещиноватость;
- моделей распределения физико-механических свойств;
- модели естественного напряжённого состояния среды и месторождения (гравитационно-тектонического НДС).

В результате построения инженерно-геологической модели разрабатывается инженерно-геологическая классификация пород и выполняется инженерно-геологическое районирование массива пород.

Вторым этапом является разработка геомеханической модели карьера, которая также обычно состоит из частных моделей:

- моделей напряжённого состояния уступов и борта карьера;
- моделей расчёта параметров нарушенной зоны;
- моделей расчёта параметров предельных обнажений.

Третьим этапом является создание расчётных моделей определяемых элементов.

Исходной информацией для построения инженерно-геологической модели являются:

- физико-механические свойства выделенных литологических разностей;
- физико-механические свойства и геометрические параметры структурных неоднородностей;
- начальное напряжённое состояние ненарушенного массива.

Указанные свойства и параметры могут быть получены традиционными методами инженерно-геологического исследования массивов горных пород (отбор представительных проб горных пород; лабораторные определения физико-механических свойств; картирование структурных неоднородностей с выделением систем и порядков неоднородностей; определение физико-механических характеристик структурных неоднородностей).

Исходной информацией для построения геомеханических моделей является:

- параметры полей статических напряжений в массиве пород в окрестности карьерной выемки;
- параметры нарушенной зоны.

Параметры полей напряжений могут быть получены путем непосредственных измерений значений напряжений натурными методами (метод разгрузки; гидроразрыва; ультразвукового каротажа скважин и т.д.).

Параметры нарушенной зоны могут быть получены прямыми наблюдениями (в том числе с использованием фото- или телевизионной съемки) и геофизическими методами (ультразвуковой каротажа скважин; сейсмическая томография; реометрия; глубинные реперы и др.).

Переходя собственно к методике оценки устойчивости бортов карьеров, следует отметить, что традиционно используемые для этого подходы приводят к техническим решениям, не всегда адекватным конкретным горно-геологическим условиям. Это происходит вследствие недостаточного учёта основных особенностей массивов высокопрочных скальных пород, а именно – их иерархически блочного строения и естественного напряжённого состояния, обусловленного в большинстве случаев действием гравитационно-тектонических полей напряжений.

Нами используется подход, учитывающий, с одной стороны, дифференциацию массива пород с точки зрения его исходных физических свойств и НДС, а с другой стороны, предполагающий формирование в приконтурной части массива нескольких зон, свойства и состояние которых изменены вследствие горных работ и отличаются от своих первоначальных параметров (Мельников и др., 2005).

Первая от контура обнажения ослабленная зона образуется под воздействием трёх факторов: перераспределения естественного или начального поля напряжений и формирования нового изменённого напряжённого состояния в приконтурной области массива; технологических воздействий (главным образом – взрывных работ); продолжительного воздействия процессов выветривания. Её мощность, степень дезинтегрированности, НДС и другие показатели не являются константой в пределах различных частей карьера, поэтому параметры устойчивости отдельных обнажений, уступов и бортов могут значительно варьировать. Применительно к конструкциям бортов карьеров различными могут быть высота и угол наклона откосов отдельных уступов, а также – углы наклона бортов в целом.

Применение модели иерархично-блочного строения массива пород позволяет обоснованно определять вид и параметры эффективных структурных неоднородностей, от которых в первую очередь зависят процессы деформирования и разрушения данного конкретного объёма пород или сооружения. В условиях работы карьеров речь может идти как о единичном уступе (иногда группе уступов), так и о борте в целом. Если для уступа эффективными, как правило, являются поверхности естественных крупноблоковых трещин, образующих структурные блоки с размером ребер от первых метров, то для борта карьера размерность эффективной структурной неоднородности будет исчисляться десятками и первыми сотнями метров. Отсюда необходимо различать понятия "устойчивость отдельного уступа или группы уступов" и "устойчивость борта карьера в целом", так как во многих случаях нарушение устойчивости отдельного уступа или группы уступов отнюдь не означает катастрофической потери устойчивости борта в целом.

Поскольку в формировании ослабленной зоны весьма велика роль технологических факторов, необходимо применение специальных методов ведения взрывных работ с целью уменьшения их динамического воздействия на законтурный массив. Одним из путей резкого снижения взрывных нагрузок на массив является предварительное целеобразование или же применение методов контурного взрывания, принципы которого достаточно детально разработаны (Фокин, 2003; Фокин и др., 2008). Но в настоящий момент применение этих методов на отечественных предприятиях сдерживается отсутствием буровых станков с уменьшенным диаметром бурения и специальных зарядов для контурных скважин.

Вопросы влияния естественных экзогенных факторов, таких, как выветривание, гипергенное минералообразование и т.п., на параметры "ослабленной зоны" в условиях карьеров остаются пока недостаточно изученными, особенно с точки зрения количественных характеристик. Однако взаимосвязь активности динамических явлений, включая потерю устойчивости или целостности отдельных конструктивных элементов, с сезонными и интенсивными периодическими водопритоками в целом устанавливается. В отношении противодействия этим явлениям традиционно применяются упреждающие меры по водоотведению, осушению, снегозадержанию и т.п. В отдельных случаях при неустойчивых породах целесообразно применение и специальных методов укрепления приповерхностных участков массива по аналогии с укреплением откосов при сооружении автомобильных и железных дорог в горной местности.

При принятии решения об оптимизации углов наклона бортов карьера недропользователь руководствуется в первом приближении одним из следующих мотивов: снизить себестоимость руды, уменьшить или сэкономить капитальные затраты и продлить эксплуатацию месторождения наиболее эффективным, открытым способом. Соответственно, в реальных условиях на относительно выдержанном по мощности месторождении возможны три стратегии реализации планов (рис. 7):

Стратегия 1 (контур 1 на рис. 7). Выражается в сохранении активных запасов (экономически эффективных, планируемых для добычи) полезного ископаемого в карьере на уровне действующего проекта или близком к нему при существенном уменьшении объёмов вскрыши за счёт изменения контура карьера. Достигается значительное улучшение технико-экономических показателей добычи (снижение себестоимости, уменьшение нагрузки на окружающую среду за счёт отказа от части земель, предназначенных для отвалов и т.д.). При этом в текущем карьерном пространстве, в котором часть уступов в верхней части уже поставлена на конечное положение, внутри исходного контура формируется довольно широкая горизонтальная или пологая зона, которая может быть задействована для различных технологических или хозяйственных нужд, например: для размещения пунктов обслуживания автосамосвалов, стоянок для пересменок и т.д. К негативным аспектам этой стратегии можно отнести нерациональное использование недр, так как предпринимаемые действия не приводят к увеличению эксплуатационных запасов. Таким образом, стратегия, прежде всего, направлена на достижение краткосрочного экономического эффекта.

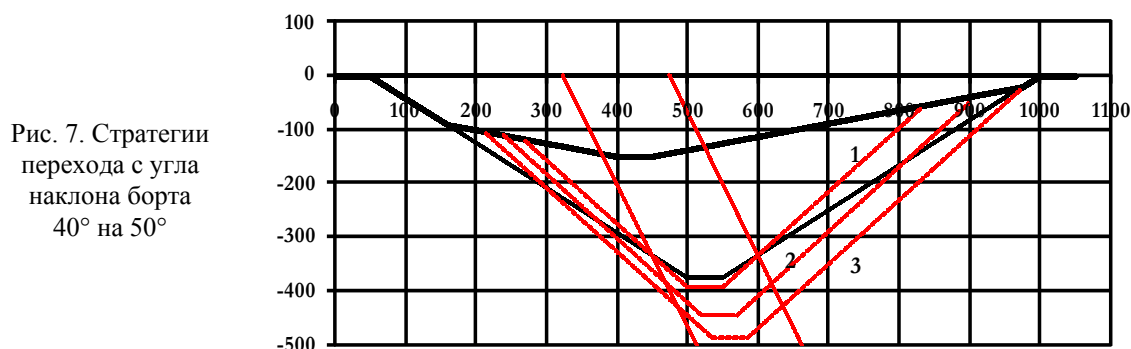


Рис. 7. Стратегии перехода с угла наклона борта 40° на 50°

Стратегия 2 (контур 2 на рис. 7). Достигается частичный прирост запасов и снижение объёмов вскрышных работ. Отстраивание борта производится в каком-либо промежуточном положении, исходя из сложившихся горнотехнических условий. Преимуществом данной стратегии является определённый прирост запасов для открытой добычи и некоторое снижение себестоимости. Также продлевается срок эксплуатации карьера.

Стратегия 3 (контур 3 на рис. 7). Отстраивание более крутого борта производится от внешнего конечного проектного контура карьера по всяческому по отношению к рудному телу крылу, которое, как правило, наиболее ограничивает возможность понижения фронта горных работ. При этом текущие объёмы вскрышных работ сохраняются на прежнем уровне, общий объём вскрышных пород возрастает, но вовлекаются в эксплуатацию значительно большие запасы полезного ископаемого. Из всех рассмотренных вариантов эта стратегия обеспечивает наибольший прирост активных запасов и увеличение сроков ведения горных работ открытым способом. Таким образом, сохраняя технико-экономические показатели горных работ относительно на постоянном уровне, удастся существенно продлить срок эффективной эксплуатации карьера и улучшить рациональность использования недр.

Выбор варианта стратегии при применении бортов новой конструкции является комплексной задачей, зависящей от большого числа факторов и требующей тщательного технико-экономического обоснования. В одном случае будут существенно снижены текущие расходы, а в другом – также существенно приращены запасы, а значит и продлён срок службы месторождения. Кроме того, на выбор влияют и природные факторы, такие как форма и мощность рудных тел, качество руды и его изменчивость на глубину.

Стратегия № 1 может быть рекомендована на первом этапе реконструкции карьера или его части (опытно-промышленного участка), так как она обеспечивает снижение текущих объёмов вскрышных работ, при этом не отвергает возможность последовательного или непосредственного перехода на стратегию 2 и 3, причём с применением ещё более крутых проектных углов наклона борта (с учётом накопленного опыта отстраивания и эксплуатации борта новой конструкции) и, следовательно, с большими прирезками запасов руды.

Параллельно отстраиванию борта карьера с крутыми углами наклона должен проводиться целый комплекс упреждающих и текущих мероприятий по контролю опасных геомеханических факторов и их предотвращению. Мерами контроля является создание систем мониторинга (сейсмического и/или акустического), а также натурные обследования уступов с целью выявления и локализации потенциально опасных структурных неоднородностей. Для создания условий безопасной работы и предотвращения возможности перепуска падающих камней и кусков породы на нижележащие уступы с дальнейшим их разгоном необходимо не только наличие площадки достаточной ширины, но и формирование гасящей щебеночной подушки из крупной фракции гравия толщиной 0,5-0,7 м или предохранительно-отражающего вала высотой 1 м с размещением гребня вала на предельном расстоянии падения камней (5-7 м для сдвоенного вертикального уступа высотой 24 м) (*Решетняк и др.*, 2005; *Фокин*, 2003; *Фокин и др.*, 2008). В глубоких частях карьера при относительно малом периметре карьерного пространства и при необходимости расширения транспортных берм можно отказаться от применения предохранительных берм, но при этом необходимы специальные дорогостоящие мероприятия по креплению откосов уступов.

Таким образом, методические основы и технологические решения эффективного и безопасного освоения глубоких горизонтов месторождений полезных ископаемых открытым способом строятся на комплексе глубоко интегрированных мультидисциплинарных фундаментальных и прикладных исследований. К настоящему времени предлагаемая методология успешно апробирована на нескольких карьерах Мурманской области (рис. 8). При этом следует отметить, что она представляет собой открытую развивающуюся систему, требующую специальных наукоемких исследований и гибкого настраивания для каждого индивидуального карьера и/или его части.

3. Заключение

Проводимые Горным институтом с участием Геологического института и Кольского филиала Геофизической службы РАН исследования по решению проблем отработки крупных месторождений открытым способом относятся к наиболее приоритетным и актуальным в области горных наук как для страны в целом, так и для Мурманской области в частности, поскольку значение горной отрасли для социально-экономического положения региона весьма существенно. Решение проблемы освоения глубоких горизонтов месторождений открытым способом требует применения комплексного, междисциплинарно-интегрированного и разномасштабного подхода к вопросам сбора и обработки исходной информации, построения частных и общих моделей, расчётов и контроля состояния приконтурного массива пород. Поэтому для реализации этих задач привлечены специалисты различного профиля из нескольких учреждений КНЦ РАН и горнорудных предприятий.



Рис. 8. Формирование борта карьера с использованием вертикальных уступов высотой 24 м (основной карьер ОАО "Ковдорский ГОК")

Исследования базируются на представлении массива пород как иерархично-блочной среды, находящейся под воздействием как природных (гидрогеология, выветривание, структура, литостатическое давление, тектоника), так и техногенных факторов (форма и размеры конструктивных элементов, технология взрывных работ и т.п.). Предложенная методология исследований, направленная на обеспечение устойчивости бортов, реализуется путём поэтапного построения частных моделей массива пород в иерархическом ряду от рассматриваемой области верхней части земной коры до конкретного участка карьера и комплексного мониторинга устойчивости элементов открытой системы разработки с использованием систем контроля, адекватных масштабу рассматриваемых участков массива пород.

Разрабатываемые научно-методические подходы позволяют достоверно оценивать свойства и состояние массива пород в пределах существующей либо проектируемой карьерной выемки, корректировать их (свойства и состояние массива пород) в процессе освоения месторождения и на этой основе рекомендовать производству параметры открытой системы разработки, адекватные существующим природно-техногенным условиям. В целом разрабатываемая методология имеет значительный инновационный потенциал и может обеспечить существенный экономический эффект.

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ № 07-05-13579-офи_ц.

Литература

Brawner C.O. Recent lessons that have been learned in open-pit mine stability. *Mining Engineering*, v.38, N 8, p.823-830, 1986.

Bye A.R., Jermy C.A., Bell F.G. Slope optimization and review of the geotechnical conditions at Sandsloot open pit. *Proceedings of Ninth International Congress on Rock Mechanics, v. 2, theme 1: Applied rock mechanics – Safety and control of the environment, Rotterdam, A.A. Balkema*, p.77-82, 1999.

Slope stability in surface mining. *Littleton, Colorado, USA. Publ. by SME*, 442 p., 2001.

Адушкин В.В., Асминг В.Э., Баранов С.В., Виноградов А.Н., Виноградов Ю.А. Землетрясения и микросейсмичность в задачах современной геодинамики Восточно-Европейской платформы. *Под*

ред. Шарова Н.В., Маловичко А.А., Щукина Ю.К. Кн. 1: Землетрясения. Петрозаводск, КарНЦ РАН, 381 с., 2007.

- Галустьян Э.Л.** Совершенствование конструкции нерабочих бортов карьеров. *Горный журнал*, № 1-2, с.93-98, 1996.
- Глазнев В.Н., Жирова А.М.** Создание и применение технологии изучения скоростных свойств интрузивных массивов при построении комплексной модели земной коры Хибинского и Ловозерского массивов Кольского полуострова. *Геофизический вестник*, № 6, с.15-19, 2007.
- Глазнев В.Н., Жирова А.М., Раевский А.Б.** Новые данные о глубинном строении Хибинского и Ловозерского массивов, Кольский полуостров. *Доклады Академии Наук*, т.422, № 3, с.391-393, 2008.
- Жиров Д.В., Рыбин В.В., Шпаченко А.К.** Эволюция хрупких деформаций массива пород Ньюкпахкского месторождения апатит-нефелиновых руд по результатам документации и анализа трещиноватости. *Тезисы докладов Всероссийской конференции "Тектонофизика и актуальные вопросы о Земле", 13-17 октября 2008 г., М., ИФЗ РАН*, с.124-127, 2008.
- Мельников Н.Н., Козырев А.А., Решетняк С.П., Каспарьян Э.В., Рыбин В.В., Мелик-Гайказов И.В., Свинин В.С., Рыжков А.Н.** Концептуальные основы оптимизации конструкции бортов карьеров Кольского полуострова в конечном положении. *Тр. 8-го между. симпозиума "Горное дело в Арктике", под ред. Мельникова Н.Н., Решетняка С.П. СПб., изд. "Типография Иван Фёдоров"*, с.2-14, 2005.
- Пожиленко В.И., Гавриленко Б.В., Жиров Д.В., Жабин С.В.** Геология рудных районов Мурманской области. *Под ред. Митрофанова Ф.П., Бичука Н.И. Апатиты, КНЦ РАН*, 359 с., 2002.
- Решетняк С.П., Фокин В.А., Тарасов Г.Е., Александров В.А., Тогунов М.Б., Данилкин А.А., Каира В.Е.** Гравитационные аспекты обеспечения безопасности работ в прибортовой зоне карьера. *Горный журнал*, № 2, с.69-72, 2005.
- Фокин В.А.** Проектирование и производство буровзрывных работ при постановке уступов в конечном положении на предельном контуре глубоких карьеров. *Апатиты, КНЦ РАН*, 231 с., 2003.
- Фокин В.А., Тарасов Г.Е., Тогунов М.Б., Данилкин А.А., Шитов Ю.А.** Совершенствование технологии буровзрывных работ на предельном контуре карьеров. *Апатиты, КНЦ РАН*, 224 с., 2008.