

5. Реконструкция карьера с целью восстановления проектной мощности Ковдорского ГОКа на основе укрупнения постоянных бортов карьера с увеличением глубины и периода открытой разработки. Проект. Том. 1. Общая пояснительная записка. Основные технические решения. Техничко-экономическая часть. Календарный план реконструкции карьера. — СПб.: Гипроруда, 2006.
6. Фокин В. А. Проектирование и производство буровзрывных работ при постановке уступов в конечное положение на предельном контуре глубоких карьеров. — Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2004. — 231 с.

Билин Андрей Леонидович,

ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Горного института Кольского научного центра Российской академии наук, кандидат технических наук,
E-mail: bilin@goi.kolasc.net.ru

Казачков Сергей Васильевич,

главный горняк отдела технического развития ОАО «Ковдорский ГОК»,
E-mail: Sergey.Kazachkov@eurochem.ru

УДК 553.3/553.4

ИНЖЕНЕРНО-СТРУКТУРНОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ МАССИВА ПОРОД КОВДОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ БАДДЕЛЕИТ-АПАТИТ- МАГНЕТИТОВЫХ И МАЛОЖЕЛЕЗИСТЫХ АПАТИТОВЫХ РУД КАК ОСНОВА ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КРУТОГО БОРТА КАРЬЕРА

Д. В. Жиров, С. А. Климов

Геологический институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия

Г. С. Мелихова

ОАО Мурманская геологоразведочная экспедиция, г. Апатиты, Россия

Abstract. *The paper gives the results of long-standing specialized studies on engineering-structural zoning of the Kovdor baddeleite-apatite-magnetite and low-ferrous apatite deposit as the basis for steep pit walls design. Engineering-geological sectors have been defined and complexly described; a relevant map of zoning has been made. The map contains initial data for designing and redesigning a deep open-pit. It also allows decreasing associated potential risks due to achieving the better level of detail, accuracy, informativeness and reliability of data (in comparison with traditional approach) about structural parameters in the whole contour rock massif involved into design process.*

Инженерно-структурное районирование является одной из разновидностей инженерно-геологического и служит для зонирования и ранжирования массива пород на структурно-однородные (квазиоднородные) участки, а также для выделения

и геометризации основных структурных неоднородностей, представляющих потенциальную опасность в ходе строительства и эксплуатации карьера. Особенно актуально проведение этих исследований при переходе к освоению глубоких горизонтов месторождений посредством проектирования и строительства карьеров с предельными углами наклона борта. Здесь необходимо отметить, что сложившаяся отечественная практика предусматривает инженерно-геологические изыскания и специальные структурные исследования по остаточному принципу в сравнении с собственно разведкой — определением геометрических, количественных и качественных параметров рудных залежей. Следствием этого является отождествление модели месторождения с блочной и/или каркасной моделью рудных тел, в которых вмещающие породы, как правило, представлены однородно неинформативным «пустым» пространством. Таким образом, основной задачей инженерно-структурного районирования служит своевременное обоснование и выдача необходимых исходных данных для проектирования глубокого карьера по результатам комплексного изучения законтурного массива пород во всём пространстве вариаций проектных решений. Комплекс современных исследований в данной области, включая разработку 3D геолого-структурной модели, был реализован в период 2008–2013 гг. на карьере рудника «Железный» ОАО «Ковдорский ГОК» [1, 2].

Общие сведения о месторождении. Ковдорское месторождение бадделеит-апатит-магнетитовых и маложелезистых апатитовых руд (КБАММ) представлено вертикальным рудным штоком с размерами в плане: длина около 1500 м и ширина 300–800 м. Рудное тело месторождения прослежено с незначительными изменениями мощности в плане (площади горизонтального сечения) и качества руды на глубину более 2000 м от поверхности. КБАММ расположено в юго-западной части Ковдорского щелочно-ультраосновного массива (КМ) центрального типа. Массив представляет собой интрузию концентрически-зонального строения, имеющую в плане овальную форму, и имеет прямую зональность, которая соответствует внедрению и смещению каждой из последующих магматических фаз от центра к периферии [3]. По геофизическим данным, КМ прослеживается, постепенно сужаясь, до глубины 20 км [4].

Месторождение образовано на завершающих стадиях формирования КМ за счет внедрения рудных карбонатитов. Оно представляет собой крупный трубообразный шток (Главная залежь) комплексных бадделеит-апатит-магнетитовых руд и серию мелких разноориентированных тел — сателлитов жилообразной формы в юго-западном и северо-восточном окончаниях рудного поля. В Главной рудной залежи сосредоточено около 97% балансовых запасов руд. Рудное тело в плане имеет форму сигмоидально деформированного эллипса, вытянутого в субмеридиональном направлении. Падение штока крутое, близкое к вертикальному.

Эксплуатация месторождения карьером рудника «Железный» была начата в 1962 г. и на сегодня добыто более 500 млн т руды. Это один из крупнейших карьеров в Кольском регионе, который имеет параметры в текущем состоянии около 2 км в длину, 1,8 км в ширину и более 400 м в глубину. Извлекаемые запасы в настоящем проекте оцениваются около 190 млн т со средними содержаниями 24,6% Fe, 6,7% P₂O₅, 0,14 ZrO₂, а извлекаемые запасы для проектируемого карьера глубиной более 800 м составляют 590 млн т со средними содержаниями 24,2% Fe, 6,7% P₂O₅, 0,16 ZrO₂ [5].

В 2000 г. начались инженерно-геологические изыскания и проектирование сверхглубокого (>800 м от поверхности) карьера [6]. Его строительство позволит пролонгировать экономически эффективную добычу руды до 2043–2048 гг.

Инженерно-геологические и гидрогеологические условия эксплуатации сложные. Для приповерхностной условий в числе наиболее важных опасных факторов являются: гидрогеологический режим (поверхностные и подземные воды), тектонические поля напряжений, разрывная тектоника и зона площадного и линейного выветривания. Для глубоких карьеров заметно возрастет роль крупных структурных неоднородностей — элементов разрывной тектоники и трещиноватости с опасным для конструкции карьера залеганием, а также гравитационной составляющей поля напряжений. Кроме того, остается на высоком уровне вклад тектонической составляющей НДС [7]. Роль гидрогеологического режима остается неизменной, так как основные водопритоки в карьер обусловлены водоносным горизонтом четвертичных отложений и атмосферными осадками.

Общие черты тектонического строения массива. Анализ материалов предшествующих работ, выполненных ФГУП ВИОГЕМ (1991–2013 гг.), ГоИ КНЦ РАН (1999–2013 гг.) и др., а также результаты собственных исследований 2008–2014 гг. в бортах карьера рудника «Железный» показывают, что формирование и развитие трещиноватости (хрупких «деформаций» или катакластических разрушений) и структурных неоднородностей разнообразно по генезису, многостадийно и характеризуется различными факторами контроля.

Ряд исследователей Ковдорского массива (В. В. Дунаев, В. Б. Соколова, С. С. Серый и др.) по результатам дешифрирования линеаментов акцентируют внимание на дифференцированных вертикальных движениях блоков разнообразной формы, однако кинематика этих смещений, если таковые и были, заметно не осложнила геологическое строение, наблюдаемое в современном эрозионном срезе. Другие исследователи отмечают спиралевидный в проекции на план характер карбонатитовой зоны месторождения и ее центростремительную зональность, обусловленные объединением и сочетанием бифокальных конических разломов, маркирующих центры тектонического развития — две субкамеры карбонатитного расплава, а также подчеркивают роль центриклинальных конических и концентрических (субцилиндрических) разломов в формировании и тектонической эволюции месторождения [8, 9].

Независимо от детальности разработки схем формирования КМ в его развитии выделяются два основных этапа: раннемагматический и позднемагматический. С этими этапами связаны последовательные внедрения в вертикальную субцилиндрическую камеру гипербазитовых, щелочных и карбонатитовых магм. Отмечается закономерность смещения геометрического центра в юго-западном направлении от более ранних к более поздним фазам, а также разворота элементов симметрии эллипсов, в первом приближении огибающих площадь развития синфазных комагматов или тектонической стадии.

На формирование современной структуры массива пород КБАММ в большей или меньшей степени оказали влияние: унаследованные в различной степени элементы строения архейской рамы, зона палеозойской тектонической (рифтогенной?) активизации Северо-Восточного (СВ) простираения (или как вариант — зона глубинного разлома с очаговым режимом транстенсии), контролирующая образование

массивов центрального типа (от массива Сокли в Финляндии через Маврагубский, Хибинский, Ловозерский, Кургинский, Контозерский массивы до побережья Баренцева моря в районе губы Ивановской), последовательность магматических фаз и смещение их центров, постмагматическая тектоническая эволюция самого Ковдорского массива, а также усложнение строения на неотектоническом этапе.

Каждый из перечисленных этапов формирует свой парагенетический комплекс структурных элементов и модифицирует существующие, что в конечном итоге образует сложнейшую картину разрывной тектоники и других структурных неоднородностей массива пород (рис. 1).

По результатам обобщения и анализа всех накопленных структурных данных был выявлен ряд закономерностей и отличительных черт тектонического строения массива пород месторождения, которые необходимо учитывать при проектировании глубокого карьера. Прежде всего, это вопросы и аспекты, касающиеся генезиса, соотношения и закономерностей распространения различных систем трещиноватости в пространстве, изменение их параметров на глубоких горизонтах, особенностей современного поля напряжений во вмещающих породах и др.

Результаты анализа и 3D моделирования позволили разделить всю трещиноватость массива пород Ковдорского бадделеит-апатит-магнетитового месторождения на 2 большие группы: прототектоническую трещиноватость, в том числе трещиноватость этапов «собственно магматического (карбонатитовой стадии) — контракционного генезиса», и новообразованную трещиноватость наложенных тектонических этапов. По отношению к месторождению они характеризуются, как «внутриформационные» и «трансформационные» соответственно [10]. Каждая группа характеризуется набором систем трещиноватости (парагенезисом) с уникальными отличительными чертами и признаками, а также закономерными связями между собой.

Установлено, что внутриформационная (прототектоническая) парагенетическая ассоциация трещиноватости в масштабах всего КМ имеет представительность 90–95 % и включает следующие основные системы: радиальную (2–3 подсистемы) — Rd с углами падения размах — 65–90° (78° — медиана), две подсистемы — S кольцевой субвертикальной (тангенциальной, поперечной по отношению к Rd) с углами падения 60–90° (74°) и две диагонально-конические: центриклинальную — С, падающую к центру массива под углами 25–55° (43°) и периклинальную — Р, падающую от центра массива под углами 5–35° (18°). Система субгоризонтальных трещин — L (углы падения 0–15°) на глубоких горизонтах проявлена незначительно.

Трещиноватость прототектонического парагенезиса имеет относительно однородное распределение в массиве пород месторождения, удовлетворительную — хорошую предсказуемость по основным параметрам, в том числе по индивидуальным (для каждой основной системы) закономерностям их изменения с глубиной и по простиранию. Так, выявлено, что наибольшую изменчивость по частоте имеют субгоризонтальные трещины, которые преобладают у поверхности и почти исчезают на глубинах более 150–200 м. Трещины диагональных систем (С и Р) уменьшают свою представительность в меньшей степени, но у них с глубиной увеличиваются углы падения в среднем на 5–7°. Наименее изменчивы трещины радиальных подсистем, хотя у них также отмечается с глубиной увеличение углов падения вплоть до субвертикальных (87–90°).

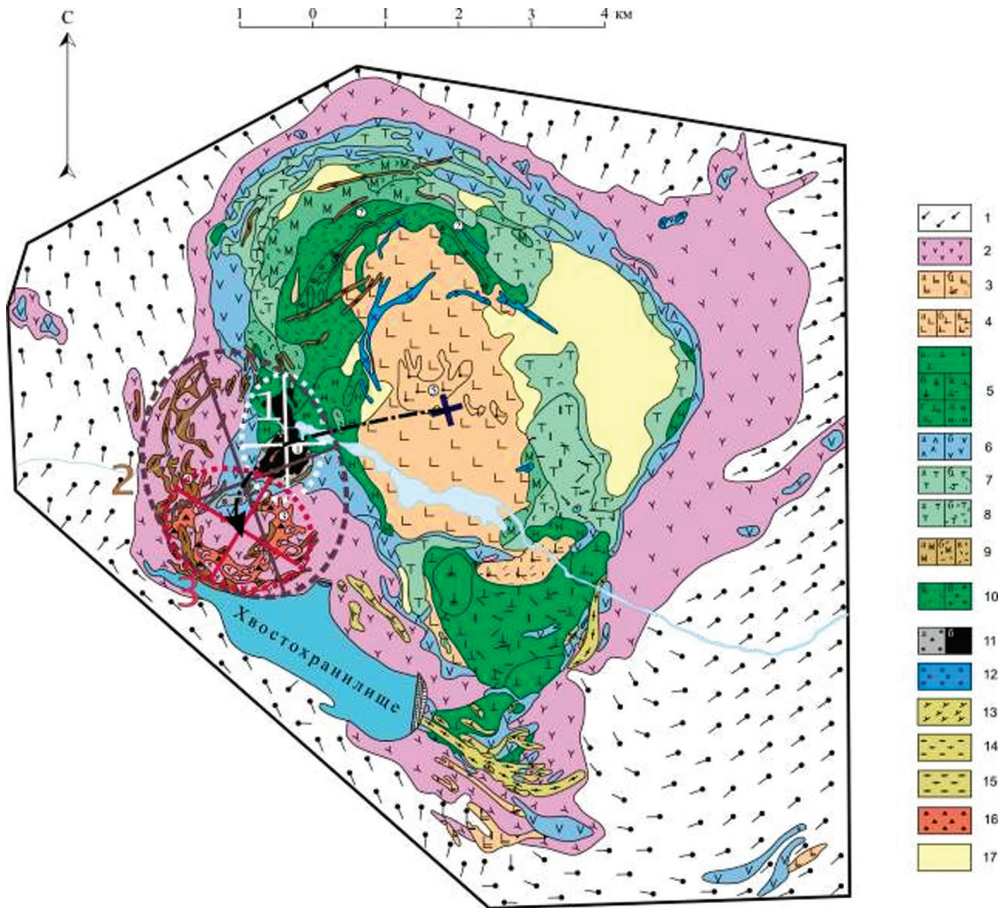


Рис. 1. Геологическая карта Ковдорского массива Афанасьева по [3] с авторскими дополнениями:

1 — гнейсы, амфиболиты и мигматиты архейского беломорского комплекса; 11: а — апатит-флогопит-форстеритовые породы (маложелезистые апатитовые руды); б — бадделейт-apatит-магнетитовые руды; 12 — нефелиновые сиениты; 13 — кальцит-apatит-флогопитовые породы; 14 — эгирин-биотит-кальцитовые карбонаты; 15 — форстерит-кальцитовые карбонаты; 16 — апатит-штаффелитовые руды; 17 — четвертичные отложения.

Цифры в кружках: 1 — апатит-магнетитовое месторождение; 2 — вермикулит-флогопитовое месторождение; 3 — апатит-штаффелитовое месторождение; 4 — карбонатов; 5 — месторождение рудных оливинитов.

Цифры большие: 1 — структурная зона апатит-магнетитового штока; 2 — кольцевая (подковообразная) зона распространения карбонатов; 3 — кольцевая (подковообразная) зона развития штаффелитов. Центр пересечения внутри круга — геометрический центр структур кольцевого/центрального типа. Стрелка показывает последовательное смещение («миграцию») центров

Наложённая тектоника пострудных этапов формирует несколько крупных разрывных нарушений (разломов) и собственных систем трещиноватости, а также реактивирует часть систем прототектонического генезиса с образованием мультикинематических дизъюнктивов, которые имеют следы неоднократных и разно-

направленных смещений в ходе эволюции месторождения. Они сформированы за счет участия отдельных элементов прототектоники в деформациях поздних тектонических этапов и их отличительной чертой является несколько (фиксируется до 3) разных направлений относительных смещений, что документируется в полевых условиях по кинематическим признакам (борозды скольжения, ориентированные сколы). Трещиноватость наложенной тектоники имеет неоднородное (локальное) распределение в массиве пород месторождения и слабую предсказуемость основных параметров. Характер ее проявления на конкретном участке выявляется только методами картирования уступов и документирования ориентированного керна с ограниченной возможностью экстраполяции за точки наблюдения.

Сочетание различных парагенетических ассоциаций трещиноватости формируют комбинаторно-наложенный характер распространения трещиноватости в объеме массива пород. Это выражается в сочетании и наложении в рамках одного участка различных по генезису и ориентации единичных трещин, их сближенных пакетов и зон трещиноватости. Наиболее опасными для устойчивости бортов и уступов являются крупные разрывные нарушения наложенной тектоники и зоны (пакеты) реактивированной трещиноватости с падением в сторону карьерной выемки под углами 33–60°.

Инженерно-структурное районирование массива пород Ковдорского месторождения. В ходе многолетних исследований КБАММ были разработаны несколько вариантов карт инженерно-структурного районирования. В основу карты районирования, подготовленной ФГУП ВИОГЕМ в 1990–2006 гг., был положен принцип иерархически-блочного строения массива пород с выделением разрывных нарушений и контролируемых ими блоков трех-четырёх основных рангов. По мере углубления карьера появилось множество данных, не укладывающихся в данную модель. Поэтому в 2008–2013 гг. нами были сделаны обобщение, анализ и переинтерпретация всех накопленных за 30-летний период исследований данных, что позволило определить новые закономерности и подходы к районированию.

В результате наших исследований было установлено, что все системы прототектонического этапа развития закономерно связаны друг с другом и изменяют свои азимутальные характеристики по закону осевой симметрии (при движении вокруг вертикальной оси симметрии, проведенной через геометрический центр карбонатитовой интрузии) [10]. Соответственно элементы симметрии и морфологии массива в целом, а также образований отдельных тектоно-магматических этапов в виде соответствующей кольцевой и/или неполнокольцевой структуры определяют количество, плотность (частоту) и характеристики систем трещиноватости, а также закономерности и связи в их парагенетической ассоциации (рис. 2).

Так как весомый вклад прототектонических элементов в общую картину трещинной тектоники оценивается не менее 90%, то эти закономерности предопределили основной принцип инженерно-структурного районирования по секторам (рис. 2).

Основными критериями выделения секторов служили проявления и сочетания следующих факторов:

— общность и/или относительная однородность (в пределах $\pm 15^\circ$) азимутальных характеристик трещинной тектоники;

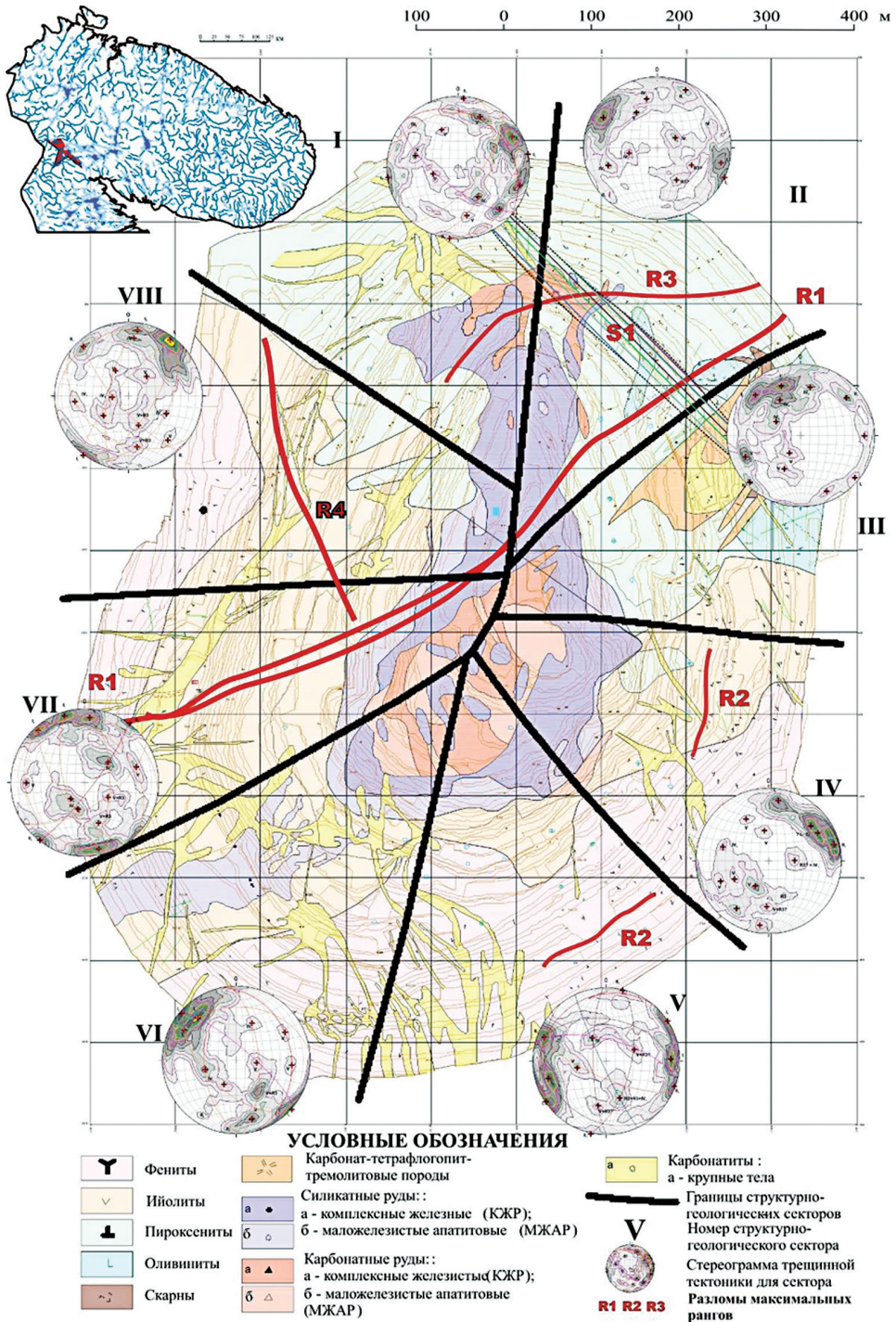


Рис. 2. Карта-схема инженерно-структурного районирования Ковдорского бадделейт-апатит-магнетитового месторождения [7]

— резкое изменение характера трещинной тектоники (принципиальное изменение плотности и пространственного расположения полюсов трещиноватости, а также их количества);

— преимущественное распространение определенных инженерно-геологических литотипов;

— появление/исчезновение структурных неоднородностей, таких как: субпараллельных или разнородно ориентированных даек, жил, зон трещиноватости и других плоскостных форм;

— границы распространения трансформационных элементов крупного ранга.

Исходя из вышеприведенных критериев было выделено 8 инженерно-структурных секторов (см. Sector I–VIII на рис. 2). По каждому из выделенных секторов в зависимости от сложности строения построены стереограммы трещиноватости, несколько опорных и дополнительных инженерно-геологических разрезов, а также подготовлена сводка по основным параметрам трещиноватости. Структурные неоднородности (трещины, разломы, зоны трещиноватости, дайки и т.п.) каждого из выделенных секторов охарактеризованы по азимутальным, частотным, морфометрическим и размерным характеристикам. Кроме того, были закартированы, геометризованы и вынесены на карту (см. рис. 2) крупные трансформационные структурные элементы (табл. 1).

Таблица 1

Иерархия и параметры основных элементов трещинной тектоники массива пород КБАММ (номер и индекс разрывного нарушения/системы трещин соответствуют рис. 1)

Структурное нарушение	Азимут простира-ния, град.	Азимут падения, град.	Угол падения, град.	Мощность, м	Примечание (степень влияния на конструкционные элементы карьера)
Трансформационные разрывные нарушения (максимальная протяженность)					
R1	38–48	310 / 130	83–90	до 25 у поверхн., 2–10 на глубине, (более 1200)	Опасность представляют вывалы и оползни вдоль собственно зоны разлома (СВ и ЗЮЗ борты), а также зона оперящей трещиноватости мощностью до 20–50 м у каждого крыла
R2–B	5–15 и 15–20	275–285 и 285–290	38–41 и 50–54	пакет — до 7–8, 1–3 (более 250)	Пересечение 2-х «реактивированных» разломов с близкими азимутальными параметрами, образуют деформацию плоскостного типа, прослеживаются на глубину 300–350 м
R2–ЮВ	42–55	312–345	41–47	пакет до 10–15, единичн. до 1,5–2 (более 500)	«Реактивированные» центриклинальные трещины образуют пакет сближенных трещин, по поверхностям которых образуется значительное обрушение плоскостного типа; трещины следятся на глубину со смещением в горизонтальной плоскости к центру карьера

Структурное нарушение	Азимут простирания, град.	Азимут падения, град.	Угол падения, град.	Мощность, м	Примечание (степень влияния на конструкционные элементы карьера)
R3	50–65	320–335	33–41	0,5–1,3 (более 400)	В текущей и проектируемой конструкции карьера опасности нарушения устойчивости бортов не представляет, в местах пересечения с уступами могут наблюдаться локальные деформации клиновидного типа и вывалов
R4	342–350	252–260	63–70	0,5–1,2 (более 350)	То же
S1	320–340	240 / 60	75–80–87	пакет трещин — до 15, одиночные 0,2–0,3 (более 300)	Пакет трещин формирует крутопадающую поверхность уступов ССВ борта в пределах горизонтов +10 ÷ +118 м. Образуется мелкие единичные плоскостные обрушения крутого залегания и комбинированные — клиновидно-плоскостные
Прототектонические системы трещиноватости (средняя протяженность)					
Rd (I)	0–360	0–360	65–90	пакет трещин до 0,5–2, одиночные до 0,2–0,3 (до 200)	Радиальная система образует до 2–3 подсистем с разностью в элементах залегания 10–15° и падением в разные стороны с углами 65–90°. Играет второстепенную роль в формировании клиновидных обрушений при пересечении с другими системами, имеющими опасное залегание
S (II)	0–360	0–360	60–90	0,2–1 (до 150)	Опасности нарушения устойчивости бортов не представляет, в местах пересечения с уступами могут наблюдаться локальные деформации клиновидного типа и вывалов
C (IV)	0–360	0–360	25–55°	0,1–0,5 (до 200)	Отмечаются во всех бортах, однако наибольшую опасность представляют для В и ЮВ бортов
P (IV)	0–360	0–360	15–35°	0,1–0,3 (до 120)	Опасности нарушения устойчивости не представляют
L (III)	0–360	0–360	0–12°	0,01–0,1 (до 30–50)	Опасности нарушения устойчивости не представляют. Преимущественно распространены в приповерхностной части

Созданная карта-схема инженерно-структурного районирования КБАММ (см. рис. 2) поддерживается в актуальном состоянии за счет оперативного внесения изменений и дополнений по результатам текущих специальных изысканий и тематических НИР, выполняемых в карьере рудника «Железный»:

- проводки инженерно-геологических скважин с отбором ориентированного керна (ОАО МГРЭ);
- геолого-структурного картирования уступов (ФГУП ВИОГЕМ, СМУУ ОАО «Ковдорский ГОК» и ГИ КНЦ РАН);
- изучения разрывной тектоники и ее кинематики (ГИ КНЦ РАН);
- изучения напряженно-деформированного состояния и тенденций его изменения (ГоИ КНЦ РАН);
- сейсмо-деформационного мониторинга (ГоИ КНЦ РАН и СМУУ ОАО «Ковдорский ГОК»).

Помимо традиционного представления инженерно-геологической информации в виде карт, планов и разрезов для КБАММ была разработана 3D инженерно-структурная модель массива пород во всём объеме изученного законтурного пространства. Эта модель предоставляет возможность интерпретации внутренней структуры массива пород (делимости и блочной иерархии) и его катакластической тектонической эволюции на принципиально новом качественном уровне, с одной стороны, и является частью системы поддержки управленческих решений в области проектирования, планирования и обеспечения геодинамической безопасности горных работ — с другой. С ее помощью можно оперативно осуществлять ситуационный анализ инженерно-структурных условий применительно к конкретному участку недр и во взаимосвязи с вариантами проектируемых решений по отстройке рабочих и конечных контуров глубокого/сверхглубокого карьера. На рис. 3 показан результат подобного ситуационного анализа в отношении опасного разлома № 62 в восточной части карьера. Полноценная 3D инженерно-структурная модель в отличие от печатных разрезов и планов позволила выявить и спрогнозировать участок, опасный на обрушение в проектируемом контуре карьера (см. сектор № 4 на рис. 2).

Выполнение инженерно-структурного районирования позволяет определить следующие важнейшие параметры для проектирования и перепроектирования глубоких карьеров:

- локализованные и геометризованные на печатной карте и разрезах, а также в 3D модели: разломы, разрывные нарушения с опасным залеганием для устойчивости уступа и борта в целом, зоны ослабления, выветривания, дезинтеграции и др. структурные неоднородности;
- геометризованные структурно-однородные (квазиоднородные) участки массива пород;
- инженерно-геологическая изученность законтурного пространства рудника и потенциально-опасных участков.

Таким образом, результаты выполненных в 2008–2014 гг. междисциплинарных исследований на руднике «Железный» ОАО «Ковдорского ГОК» позволили разработать и успешно апробировать карту инженерно-структурного районирования. Эта

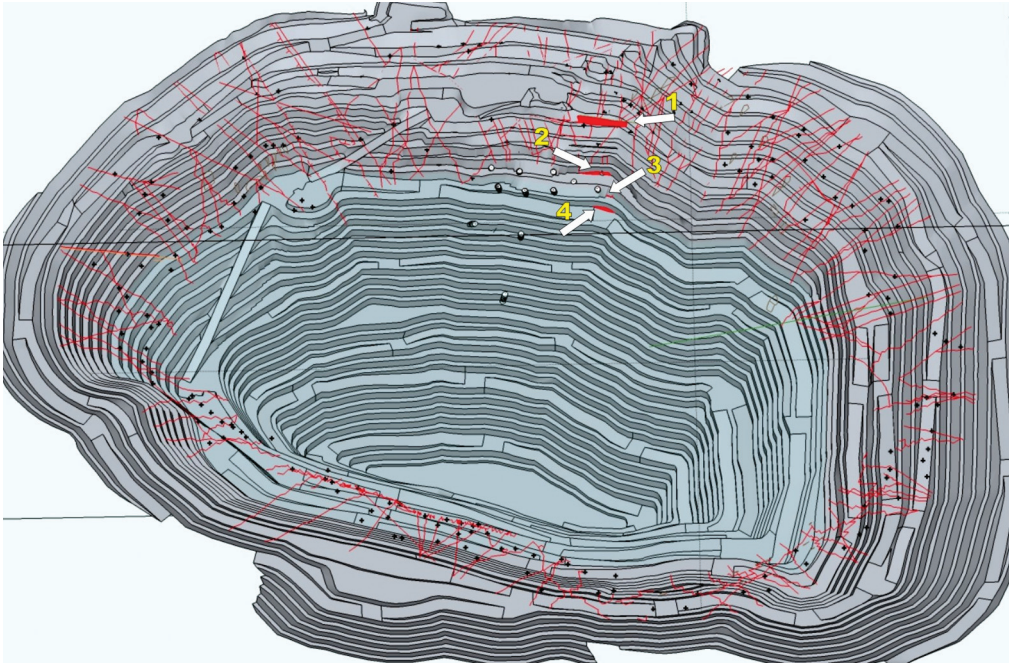


Рис. 3. Фактически установленные по состоянию на 01.01.2014 г. и предполагаемые по результатам 3D моделирования локальные участки выхода разрывного нарушения № 62 (заливка красным) в проектируемый контур В борта: стрелка № 1 — деформация на уступах гор. +142 ÷ +70; стрелка № 2 — деформация от 15.05.2013 г. на гор. +10 ÷ -20 м; стрелка № 3 — деформация от 05.10.2013 г. на уступе между гор. -20 ÷ -50 м; стрелка № 4 — ожидаемая деформация на уступе между гор. -50 ÷ -70 м (над путепроводом)

карта предоставляет необходимые исходные данные для проектирования и перепроектирования вариантов глубокого карьера и позволяет снизить связанные с этим процессом потенциальные риски за счет достижения принципиально лучшего по сравнению с традиционным подходом уровня детальности, точности, информативности и достоверности материалов о структурных параметрах во всём объеме приконтурного массива пород, вовлеченного в процесс проектирования.

В совокупности с описательной частью и результатами других инженерно-геологических исследований формируется необходимая и достаточная база для обоснованного повариантного моделирования и проектирования на основе программного комплекса «MineFrame» конструкции бортов карьера и их потенциально опасных участков с учетом всех их индивидуальных особенностей [11]. Адекватность полученных моделей реальному объекту, а также динамика изменения исходных параметров в процессе разработки месторождения контролируется результатами постоянного комплексного интегрированного мониторинга региональной и локальной сейсмичности, деформаций уступов и гидрогеологического режима.

Исследования выполнены в рамках гранта по приоритетному направлению деятельности РНФ «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых

научных исследований отдельными научными группами» № 14-17-00751 (научн. рук. проф. А. А. Козырев).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Melikhova G.S, Zhirov D. V. & Perein V. N.* New structural engineering survey method for design and opetation of deep open pit mines. — World finance review. March 2012. — London: Finetime Ltd. — P. 10–11.
2. *Жиров Д. В., Рыбин В. В., Мелихова Г. С.* Инженерно-геологическое и геодинамическое районирование массивов пород как базис для проектирования комплексной системы мониторинга и интерпретации его результатов // Мониторинг природных и техногенных процессов при ведении горных работ. Материалы докладов Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Горный институт КНЦ РАН, Апатиты, 24–27 сентября 2013 г. — Апатиты; СПб, 2013. — С. 267–272.
3. *Афанасьев Б. В.* Минеральные ресурсы щелочно-ультраосновных массивов Кольского полуострова. — СПб: Изд-во «Роза ветров», 2011. — 224 с., 72 ил.
4. *Пожиленко В. И., Гавриленко Б. В., Жиров Д. В., Жабин С. В.* Геология рудных районов Мурманской области. — Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2002. — 359 с.
5. *Епифанова М. С., Федоров С. А., Козырев А. А., Рыбин В. В., Волков Ю. И.* Инженерно-геологические аспекты проектирования глубокого карьера Ковдорского ГОКа // Горный журнал. — 2007. — № 9. — С. 30–33.
6. *Туголуков А. В., Кампель Ф. Б., Быховой А. Н., Жабин С. В., Дунаев В. А.* Интенсификация использования природных и техногенных минерально-сырьевых ресурсов // Горный журнал. — 2007. — № 9. — С. 14–19.
7. *Жиров Д. В., Мелихова Г. С., Рыбин В. В., Климов С. А.* Новая методика комплексные инженерно-геологические и геомеханические исследования массивов пород в целях проектирования и эксплуатации глубоких карьеров // Глубокие карьеры. Материалы научно-технической конференции с международным участием, 12–16 июня 2012 г. / ГоИ КНЦ РАН. — Апатиты; СПб., 2012. — С. 368–382.
8. *Дунаев В. А.* Структура Ковдорского месторождения // Геология рудных месторождений. — 1982. — № 3. — С. 28–36.
9. *Дунаев В. А.* Закономерности размещения бадделейт-апатит-магнетитовых руд // Руды и металлы. — 1997. — № 1. — С. 50–59.
10. *Сим Л. А., Жиров Д. В., Маринин А. В.* Реконструкция напряженно-деформированного состояния восточной части Балтийского щита // Геодинамика и тектонофизика. — 2011. — Т. 2, № 3. — С. 219–243.
11. *Лукичев С. В., Наговицын О. В., Морозова А. В.* Моделирование рудных и пластовых месторождений в системе MineFrame // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2004. — № 5. — М.: МГГУ. — С. 296–301.

Жиров Дмитрий Вадимович,

начальник отдела инноваций Федерального государственного бюджетного учреждения науки Геологического института Кольского научного центра РАН,
E-mail: zhirov@geoksc.apatity.ru

Климов Сергей Андреевич,

ведущий инженер-программист Федерального государственного бюджетного учреждения науки Горного института Кольского научного центра РАН

Мелихова Галина Сергеевна,

главный гидрогеолог ОАО «Мурманская геологоразведочная экспедиция»,
E-mail: melihovags@mgre.ru