

УДК 622.831.3

Козырев Анатолий Александрович
доктор технических наук, профессор,
заведующий лабораторией геомеханики,
Горный институт КНЦ РАН,
184209, г. Апатиты, ул. Ферсмана, д. 24
e-mail: kozar@goi.kolasc.net.ru

Константинов Константин Николаевич
научный сотрудник,
Горный институт КНЦ РАН
e-mail: const@goi.kolasc.net.ru

Рыбин Вадим Вячеславович
доктор технических наук,
ведущий научный сотрудник,
Горный институт КНЦ РАН
e-mail: rybin@goi.kolasc.net.ru

Бушков Владимир Кириллович
кандидат технических наук,
заведующий лабораторией геомеханики
и инженерных исследований,
ООО «Полус Проект»
e-mail: BushkovVK@polyus.com

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ПАРАМЕТРОВ НАПРЯЖЕННОГО
СОСТОЯНИЯ ПРИБОРТОВОГО
МАССИВА ПОРОД
КАРЬЕРА «ВОСТОЧНЫЙ»
ОЛИМПИАДИНСКОГО
ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

Аннотация:

В результате исследований напряженного состояния прибортового массива пород карьера «Восточный» Олимпиадинского золоторудного месторождения, выполненных методом разгрузки в варианте торцевых измерений на трех наблюдательных станциях в пределах одного инженерно-геологического блока, показано, что поле действующих напряжений относится к гравитационно-тектоническому типу. Максимальная компонента главных напряжений субгоризонтальна и действует в зоне влияния карьерной выемки параллельно контуру карьера. Реконструкция направления действующих за пределами зоны влияния карьерной выемки напряжений, выполненная по результатам сопоставления данных исследований на различных участках месторождения, свидетельствует о субравнокомпонентном сжатии массива в горизонтальной плоскости. При этом вертикальные напряжения определяются собственным весом вышележащих пород. Исследования нарушения, выполненные методами телевизионного контроля скважин и ультразвукового каротажа, показали, что в законтурном массиве выделяется зона повышенной техногенной трещиноватости. Но в целом общую трещиноватость пород по трассе исследовательских скважин можно характеризовать как умеренную. С целью уточнения выводов о параметрах действующих субгоризонтальных напряжений за пределами карьерной выемки в нетронутом массиве целесообразно в дальнейшем выполнить измерения в пределах всех выделяемых инженерно-геологических блоков борта карьера «Восточный».

Ключевые слова: геомеханика, напряженное состояние массива пород, наблюдательная станция, метод разгрузки, ультразвуковой каротаж

DOI: 10.25635/2313-1586.2018.03.061

Kozyrev Anatoliy A.
Doctor of Engineering, Professor,
Head of Laboratory,
Mining Institute KSC RAS,
84209, Apatity, Fersmana street, 24
e-mail: kozar@goi.kolasc.net.ru

Konstantinov Konstantin N.
Research Worker,
Mining Institute KSC RAS
e-mail: const@goi.kolasc.net.ru

Rybin Vadim V.
Doctor of Engineering,
Mining Institute KSC RAS
e-mail: rybin@goi.kolasc.net.ru

Bushkov Vladimir K.
Candidate of Technical Sciences,
Head of Laboratory for geomechanics
and engineering researches,
ООО “Polus Proyekt”
e-mail: BushkovVK@polyus.com

**EXPERIMENTAL DETERMINATION
OF THE PARAMETERS OF THE STRESSED
STATE OF THE ADJACENT ROCK MASS
NEARBY THE OPEN PIT WALL:
“VOSTOCHNY” QUARRY
OF THE OLIMPIADINSKOE GOLD DEPOSIT**

Abstract:

The stressed state of the rock mass nearby the Vostochny open-pit, Olimpiadinskoe gold deposit, has been studied with loading-out methods in the end-face measurement variant of three observing stations within an engineering-geological block.

The studies have shown that the field of acting stresses is one of the gravitational-tectonic type. The maximum component of the main stresses is subhorizontal and acts in the zone of influence of the open-pit excavation parallel to the open-pit contour.

Reconstruction of the direction of stresses acting outside the zone of influence of open-pit excavation has been performed on the basis of the comparison of research data, and evidences the subequal component compression of the rock mass in the horizontal plane.

The vertical stresses are determined by the weight of the overlying rocks. The disturbance of the out-boundary rock mass, fixed by television control methods of wells and ultrasonic logging have shown a zone of increased technogenic fracturing. But in general, it is possible to characterize the common fracturing as moderate.

In order to clarify conclusions about the parameters of acting sub-horizontal stresses outside the career excavation in intact area it is useful to carry out in the future measurements within all allocated engineering-geological blocks of the open pit “Vostochny”.

Keywords: geomechanics, stress state of rock mass, observation station, relief method, loading-off method, ultrasonic logging

Олимпиадинское месторождение расположено в центральной части Енисейского кряжа в пределах юго-западной части Среднесибирского плоскогорья (рис. 1) [1], в узле пересечения тектонических разломов и осложнено диагональными и меридиональными разрывными нарушениями с углами падения $40 - 80^\circ$. Вдоль них наблюдаются зоны повышенной трещиноватости, расланцевания, смятия и брекчирования. Развита кора выветривания мощностью от 10 до 150 м. Основным объектом горных работ Олимпиадинского ГОКа является карьер «Восточный», доля которого в производстве комбината достигает 95 % [2].

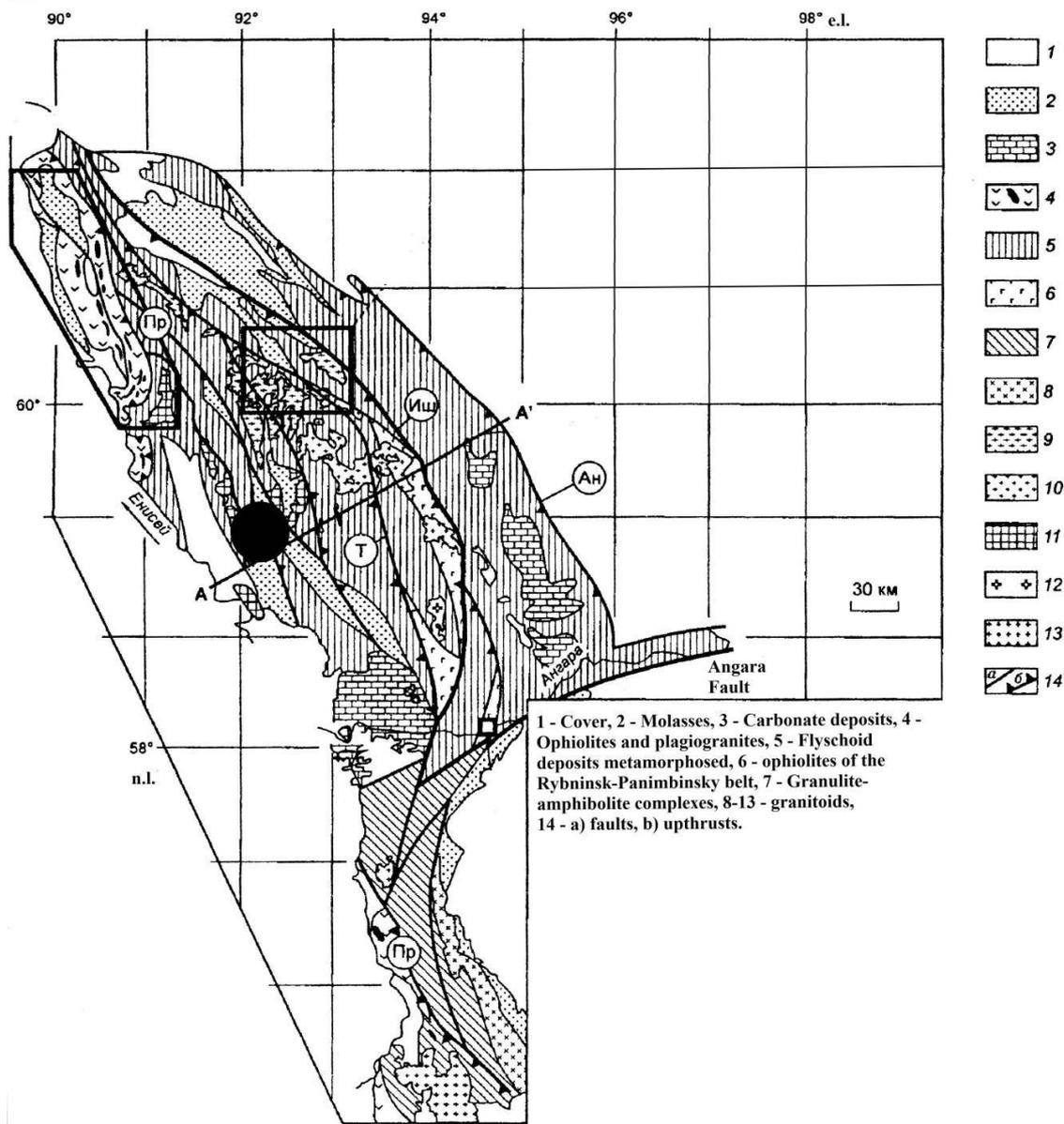


Рис. 1 – Схематическая тектоническая карта Енисейского кряжа [1].

Кружком черного цвета обозначено местоположение Олимпиадинского месторождения

Борт карьера «Восточный» сложен преимущественно крепкими породами. Анализ данных о физико-механических свойствах представительных разностей пород Олимпиадинского золоторудного месторождения, обрабатываемого карьером «Восточный», показывает, что наиболее прочные разновидности сланцев характеризуются показателями предела прочности при одноосном сжатии и растяжении 132 и 7 МПа, соответственно, и относятся, таким образом, к категории крепких пород. Наименее прочными

по сравнению с другими петрографическими разностями являются выветрелые сланцы с показателями $\sigma_{сж}=35$ МПа и $\sigma_p=3$ МПа. Прочностные показатели для пород средней крепости составляют $\sigma_{сж}=87$ МПа и $\sigma_p=6$ МПа.

Основными факторами, влияющими на устойчивость уступов и борта карьера в целом, являются сложные геолого-структурные, гидрогеологические особенности месторождения и развитые на приповерхностных горизонтах карьера процессы выветривания и окисления.

По данным инженерно-геологического районирования наименее благоприятен с точки зрения устойчивости групп уступов инженерно-геологический блок (ИГБ) №II в центральной части карьера, который представляет собой зону сочленения разломов, сложенных породами, характеризующимися относительно низкими прочностными характеристиками, значительной обводненностью и интенсивным развитием процессов выветривания. Наиболее благоприятные с точки зрения устойчивости – ИГБ № I (центральный и западный участки борта) и III (северный участок борта). Геомеханическое состояние южного участка борта карьера «Восточный» в пределах ИГБ № IV, сложенного преимущественно крепкими породами, осложняется наличием северо-восточного разлома, структурные элементы которого залегают субпараллельно контуру борта, представляя угрозу устойчивости данного участка.

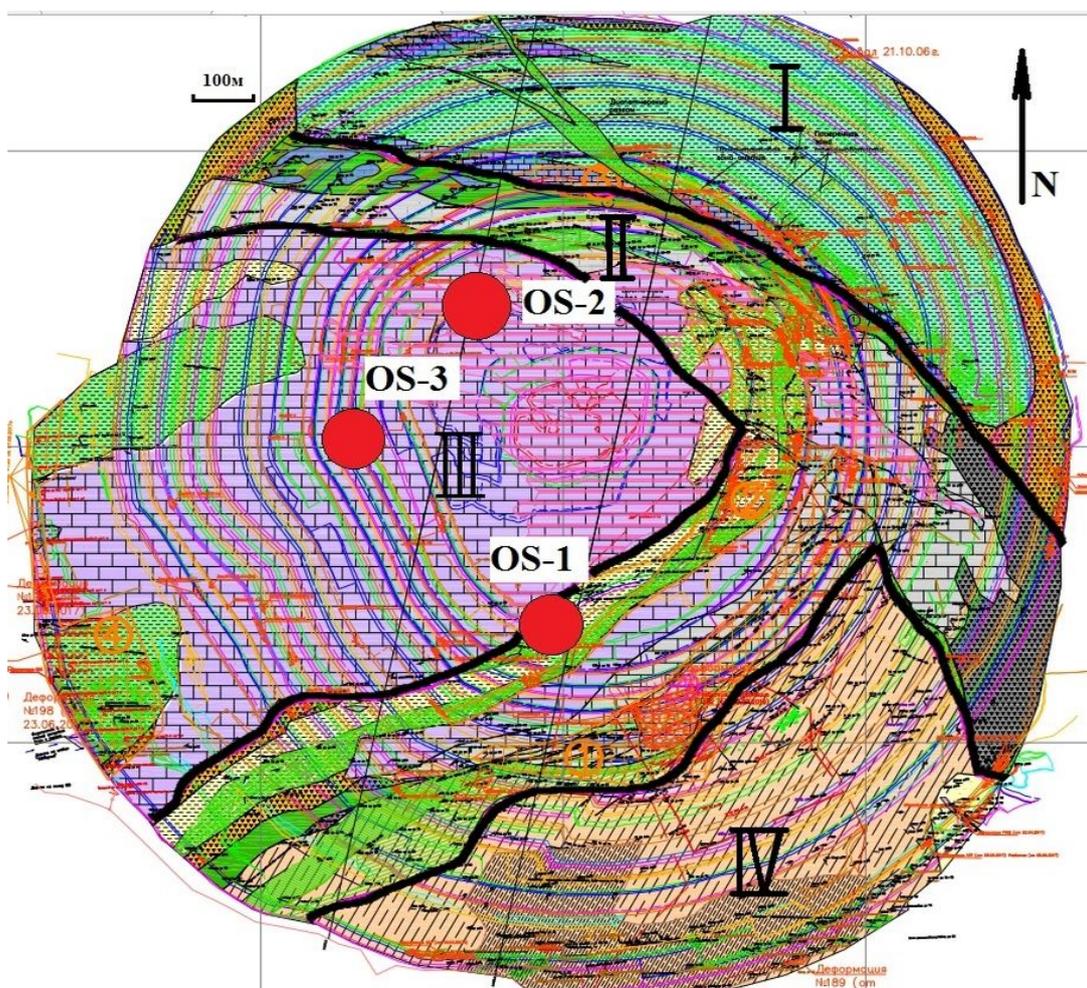


Рис. 2 – Местоположение НС-1, 2 и 3 (кружки серого цвета) на фрагменте карты инженерно-геологического районирования карьера «Восточный». Линиями черного цвета обозначены границы ИГБ

Таким образом, ориентируясь на общее геологическое описание и анализ тектонического строения исследуемого массива пород, можно сказать, что существуют предпосылки того, что в его пределах могут действовать повышенные субгоризонтальные напряжения. Существуют данные о том, что ориентировочно для 60 % массивов пород рудных месторождений характерен гравитационно-тектонический тип напряженно-деформированного состояния (НДС) [3 – 5]. Ранее в пределах Олимпиадинского месторождения выполнялись исследования НДС массива пород с использованием данных о смещениях земной поверхности, которые показали действие в нем поля напряжений гравитационно-тектонического вида [6].

Методика проведения исследований

С целью дальнейшего уточнения типа действующего поля напряжений и получения параметров напряженного состояния в массиве пород, слагающем борт карьера «Восточный», привлечен комплекс натуральных методов, включающий в себя метод разгрузки (МР) в торцевом варианте, ультразвуковой каротаж (УК) и метод телевизионного контроля скважин (ТКС). Для проведения исследований были оборудованы три наблюдательных станции (НС) – по одной на северном, южном и западном участках борта (рис. 2). Наблюдательная станция состоит из одной колонковой скважины диаметром 76 мм, длиной 50 м, пробуренной под углом $\sim 3^\circ$ к горизонту.

В Горном институте КНЦ РАН накоплен значительный опыт определения напряженно-деформированного состояния скальных массивов методом разгрузки в варианте торцевых измерений, интерпретации полученных результатов и их сопоставления с расчетными значениями напряжений в моделях массива, использующих закономерности механики сплошной среды [7 – 9].

Метод разгрузки являлся основным экспериментальным натурным методом измерения напряжений. В основу метода положено использование физического свойства – упругой деформируемости пород под нагрузкой [10]. С целью изучения упругих свойств и трещиноватости в законтурном массиве пород применялся ультразвуковой каротаж скважин. Физические принципы решения указанных задач основаны на использовании инвариантных физических величин – скоростей упругих волн, реагирующих как на вариации напряженного состояния, так и на структурные особенности массива горных пород. Визуально оценить параметры трещиноватости (интенсивность (шт./м.), раскрытие (мм) и пр.), наличие геологических неоднородностей (дайки, вкрапления и пр.) в сухих и обводненных скважинах позволяет метод ТКС.

Результаты исследований и их анализ

На рис. 3 приведена принципиальная схема измерений параметров действующих напряжений в массиве пород с использованием метода разгрузки в торцевом варианте.

В результате обработки данных единичных замеров были получены усредненные значения максимальной (σ_{\max}) и минимальной (σ_{\min}) компонент действующих напряжений по каждой исследовательской скважине в плоскости, перпендикулярной оси исследовательской скважины (см. рис. 3). Параметры действующего в прибортовом массиве пород напряженного состояния (σ_{\max} , σ_{\min} и наклон σ_{\max} к линии горизонта) приведены в табл. 1. Так, в массиве пород скважины НС-1 значение максимальной компоненты действующих напряжений составляет 13 МПа, минимальной – 3 МПа. В массиве пород скважины НС-2 σ_{\max} составляет 14 МПа, а σ_{\min} в среднем составляет 1 МПа. Максимальная и минимальная компоненты действующих напряжений в массиве пород скважины НС-3 в среднем составляют 17 и 15 МПа.

Для сравнения результатов определения параметров напряженного состояния методом разгрузки и параметров напряженного состояния массива при гравитационном виде напряженного состояния была проведена оценка параметров напряжений в прибортовом массиве пород исходя из действия только собственного веса вышележащих пород.

В случае гравитационного вида напряженного состояния вертикальные и горизонтальные напряжения в массиве определяются следующим образом:

$$\sigma_{\text{верт}} = \gamma \times H; \tag{1}$$

$$\sigma_{\text{гор}} = \lambda \times \sigma_{\text{верт}}, \tag{2}$$

где $\sigma_{\text{верт}}$, $\sigma_{\text{гор}}$ – вертикальные и горизонтальные напряжения в массиве пород от собственного веса вышележащих пород; γ – собственный вес пород, т/м³ (ориентировочно $\gamma = 2,75$ т/м³); λ – коэффициент бокового отпора, в общем случае $\lambda = \nu / (1 - \nu)$; ν – коэффициент Пуассона (для пород Олимпиадинского месторождения принимаем в среднем $\nu = 0,25$).

Таким образом, для НС-1 значения $\sigma_{\text{верт}}$ и $\sigma_{\text{гор}}$ от собственного веса пород составят 12,9 и 4,3 МПа, соответственно; для НС-2 – $\sigma_{\text{верт}} = 13,2$ МПа, $\sigma_{\text{гор}} = 4,4$ МПа; для НС-3 – $\sigma_{\text{верт}} = 11,3$ МПа, $\sigma_{\text{гор}} = 3,6$ МПа.

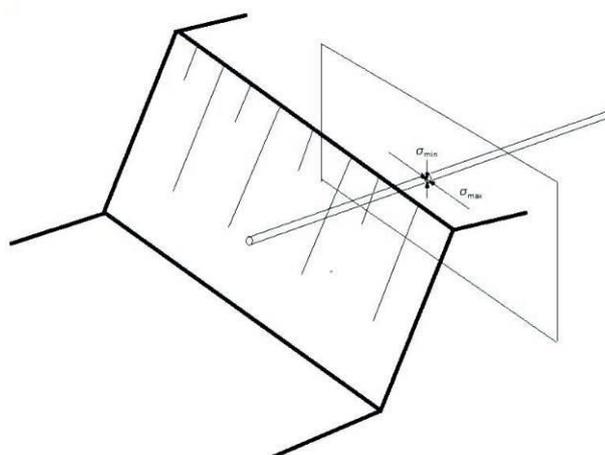


Рис. 3 – Схема измерений параметров действующих напряжений в массиве пород с использованием метода разгрузки в торцевом варианте

Таблица 1

Данные измерений параметров напряженного состояния массива пород в карьере «Восточный» Олимпиадинского ГОКа

Станция, абсолютная отметка	Глубина расположения НС от первоначального рельефа Н _{ср} , м	Параметры напряженного состояния массива пород по результатам измерений			Модуль упругости •10 ⁻⁴ , МПа	Расчетные горизонтальные напряжения в массиве исходя из гравитационного вида напряженного состояния, $\sigma_{\text{гор}}$, МПа
		σ_{max} , МПа	σ_{min} , МПа	наклон к горизонту σ_{max} , °		
1	2	3	4	5	6	7
НС-1, +230 м	470	13	3	-2	7,2	4
НС-2, +220 м	480	14	1	55	9,2	
НС-3, +290 м	410	17	15	-8	9,3	

Примечание к табл. 1. Значения действующих и расчетных напряжений, а также углы наклона векторов округлены до целых значений.

При этом необходимо учитывать, что в результате формирования карьерной выемки действующие напряжения в прибортовом массиве пород перераспределяются, вертикальные напряжения за счет выемки вскрыши и руды могут снижаться.

Расчетные значения горизонтальных напряжений, которые могут действовать в массиве пород исходя из действия только собственного веса вышележащих пород, также приведены в табл. 1 (столбец 7).

Характеристикой ориентации измеренных напряжений в плоскости, перпендикулярной оси исследовательской скважины, является наклон σ_{\max} к линии горизонта (направление действия σ_{\min} перпендикулярно σ_{\max}) (рис. 4). Видно, что направление действия вектора σ_{\max} для 1-й и 3-й станций субгоризонтально (наклон σ_{\max} к линии горизонта составляет 2° и 8° , соответственно). В случае НС-2 наклон σ_{\max} к линии горизонта составляет 55° , что, по-видимому, объясняется геологическими особенностями участка измерений. Таким образом, на двух станциях из трех максимальная компонента главных напряжений ориентирована субгоризонтально.

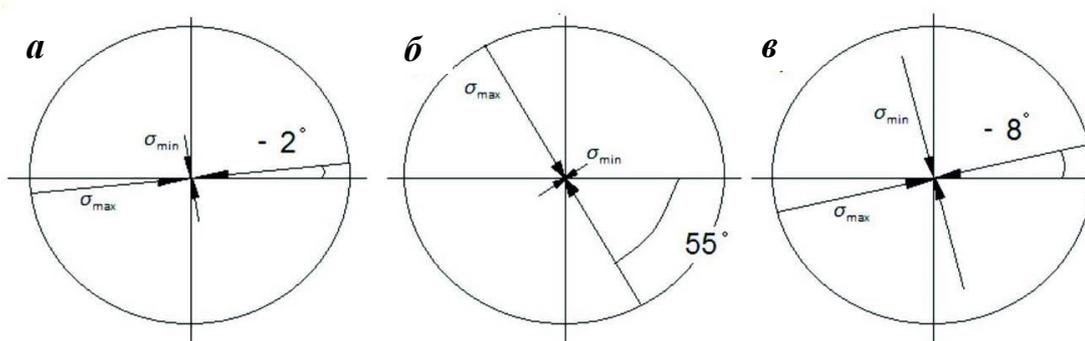


Рис. 4 – Наклон компонент главных напряжений к линии горизонта в плоскости, перпендикулярной оси исследовательских скважин:
а – НС-1; б – НС-2; в – НС-3

Из сравнения измеренных и расчетных абсолютных значений напряжений, действующих горизонтально (по НС-1 и 3), видно, что измеренные напряжения в несколько раз превышают расчетные, полученные согласно гравитационной гипотезе (см. табл. 1).

На основе вышеизложенного можно сделать следующий предварительный вывод о действии в пределах ИГБ № III карьера «Восточный» Олимпиадинского ГОКа субгоризонтальных тектонических напряжений с абсолютным значением 13-17 МПа, что дает определенные основания для отнесения напряженного состояния Олимпиадинского месторождения к гравитационно-тектоническому типу.

Результаты исследований методами УК и ТКС свидетельствуют об умеренной нарушенности законтурного массива пород вследствие техногенного воздействия взрывных работ. Так, мощность нарушенной зоны составляет 5, 2,5 и 7 м, соответственно, для НС-1, 2, 3. При этом за пределами нарушенной зоны интенсивность трещиноватости составляет $0,5 \div 0,8$ шт./п.м. Эти показатели качественно коррелируют с данными ультразвукового каротажа, свидетельствующими о непрохождении ультразвукового импульса в околоскважинном массиве пород на участках с повышенной трещиноватостью.

Помимо этого сравнение скоростей прохождения упругих волн, выполненное ультразвуковым методом в скважине и в образцах керна, показало превышение значений скорости продольной волны в образцах относительно скорости в массиве, что является следствием невысокого уровня измеренных напряжений и недостаточной чувствительностью ультразвукового метода.

Ввиду важности перехода от определения параметров напряженного состояния приконтурного массива пород к параметрам действующих напряжений на «бесконечно-

сти» (за пределами влияния карьерной выемки), была выполнена следующая реконструкция.

Для последующего перехода к рассмотрению только параметров субгоризонтальных напряжений, действующих в горизонтальной плоскости, сразу необходимо отметить, что исходя из полученных результатов, несмотря на некоторый разброс данных, вертикальная составляющая горного давления определяется собственным весом вышележащих пород и может быть оценена по формуле $\sigma_{\text{верт}} = \gamma H$ (γ – собственный вес пород, H – глубина).

Параметры действующих напряжений в горизонтальной плоскости за пределами зоны влияния карьерной выемки на «бесконечности» можно оценить путем подбора возможных нагрузок, действующих в меридиональном («север–юг») и широтном («запад–восток») направлениях (P и Q , соответственно).

На рис. 5 показана упрощенная схема, иллюстрирующая полученные абсолютные значения субгоризонтальных напряжений и их ориентацию относительно круглого отверстия, которым аппроксимируется карьерная выемка (см. рис. 3). Рассматривается плоская схема нагружения, по краям которой заданы нагрузки P и Q . При этом для НС-2, расположенной на северном участке борта карьера, взято абсолютное значение проекции σ_{max} на горизонтальную плоскость, составляющее ориентировочно 8 МПа.

Указанные на рис. 5 абсолютные значения напряжений на контуре карьерной выемки можно интерпретировать как тангенциальные, действующие на контуре круглого отверстия. В этом случае, исходя из общих закономерностей распределения напряжений в окрестности круглых отверстий, можно записать следующие соотношения:

$$\sigma_{1,2} = 3Q - P; \quad (3)$$

$$\sigma_3 = 3P - Q. \quad (4)$$

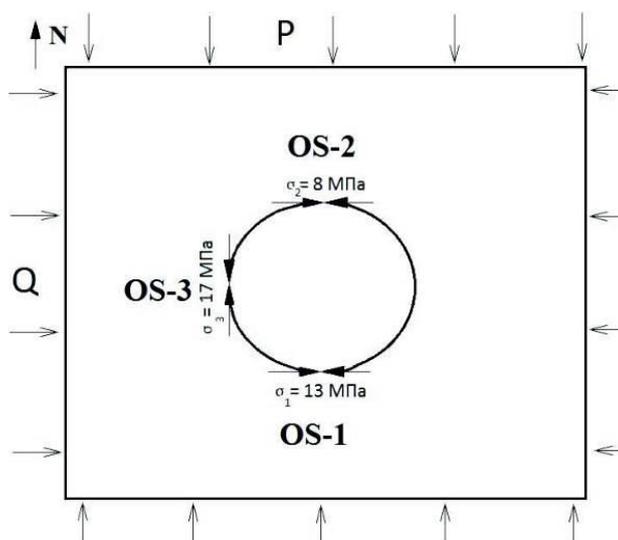


Рис. 5 – Упрощенная схема, иллюстрирующая полученные абсолютные значения субгоризонтальных напряжений и их ориентацию относительно круглого отверстия

Исходя из указанных выше соотношений можно подобрать значения P и Q , зная значения тангенциальных напряжений на контуре круглого отверстия σ_1 , σ_2 , σ_3 ($\sigma_1 = 13$ МПа; $\sigma_2 = 8$ МПа; $\sigma_3 = 17$ МПа).

В результате рассмотрения различных вариантов, действующих на «бесконечности» P и Q , можно предположить значение $P = 8$ МПа, $Q = 7$ МПа. В этом случае получается совпадение расчетных и измеренных значений тангенциальных напряжений на НС-1 и НС-3, то есть $\sigma_1 = 13$ МПа и $\sigma_3 = 17$ МПа.

Что касается данных по НС-2, то необходимо отметить, что в данном случае имеет место погрешность либо по абсолютному значению проекции максимальной компоненты главных напряжений на горизонтальную плоскость (измеренное значение $\sigma_{\max} = 8$ МПа и расчетное значение $\sigma_2 = 13$ МПа), либо по наклону максимальной компоненты главных напряжений к горизонтальной плоскости ($\sigma_{\max} = 14$ МПа с наклоном к горизонту 55° ; проекция σ_{\max} на горизонтальную плоскость соответствует 8 МПа).

Во всяком случае, в первом приближении можно предполагать $P = 8$ МПа, $Q = 7$ МПа на глубине 450 м.

Выводы

Таким образом, в результате выполненных исследований напряженного состояния массива пород в окрестности карьера «Восточный» Олимпиадинского месторождения и их анализа можно сделать следующие основные выводы:

1. Существуют основания для отнесения напряженного состояния массива пород Олимпиадинского месторождения к гравитационно-тектоническому виду, при этом вертикальные напряжения в массиве определяются собственным весом вышележащих пород.

2. Абсолютные значения действующих в прибортовом массиве карьера субгоризонтальных напряжений и их концентрации находятся в диапазоне от 13 до 17 МПа на глубине от 410 до 480 м от первоначального рельефа местности с учетом выемки вскрыши и руды.

3. Существуют основания предполагать, что абсолютные значения действующих за пределами зоны влияния карьерной выемки напряжений в горизонтальной плоскости в меридиональном (направление «север-юг») и в широтном («запад-восток») направлениях соответствуют значениям $P \approx 8$ МПа и $Q \approx 7$ МПа на глубине до 450 м, что свидетельствует о субравнокомпонентном сжатии массива в горизонтальной плоскости.

Сделанные выводы, в особенности касающиеся параметров действующих субгоризонтальных напряжений за пределами карьерной выемки на «бесконечности», являются предварительными, требуют уточнения путем проведения дополнительных измерений и реконструкции полей напряжений, но в целом коррелируют с результатами ранее выполненных исследований [6].

Литература

1. Верниковский В.А. Тектоника и эволюция гранитоидного магматизма Енисейского кряжа / В.А. Верниковский, А.Е. Верниковская // Геология и геофизика. - 2006. - Т. 47. - № 1. - С. 35 – 52.
2. Аверин А.А. Опыт отработки карьера «Восточный» в сложных горнотехнических условиях / А.А. Аверин, А.Ю. Скуденков, А.В. Поляков // Горный журнал. - № 6. - 2007. - С. 20 – 23.
3. Сейсмичность при горных работах / А.А. Козырев, В.И. Панин, С.Н. Савченко и др. – Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2002. – 325 с.
4. Козырев А.А. Закономерности распределения тектонических напряжений в верхней части земной коры / А.А. Козырев, С.Н. Савченко // Физика Земли. - 2009. - № 11. - С. 34 – 43.
5. Zoback, M.L., Zoback, M.D., Adams, J. et al. Global patterns of tectonic stress // Nature. – 1989. - V. 341. No. 6240. - P. 291-298.
6. Обоснование напряженно-деформированного состояния массива горных пород в районе карьера «Восточный» Олимпиадинского ГОКа. Открытые горные работы в XXI веке: Сборник материалов Международной научно-технической конференции / А.Д. Сашурин, В.В. Мельник, А.А. Панжин, Н.И. Сартаков, В.К. Бушков, В.И. Спирин. – М.: Изд-во НТЦ «Горное дело», 2011. - С. 373 – 378.

7. Methodical approach to value of an optimal open pit slope angle in hard rocks / Nikolay N. Melnikov, Anatoliy A. Kozyrev, Serguei P. Reshetnyak, Eduard V. Kasparian, Vadim V. Rybin // Proceeding of the ISRM International Symposium 3rd ARMS, Ohnishi & Aoki (eds); Millpress, Rotterdam. - 2004. - P. 509 – 513.

8. Обоснование конструкций устойчивых бортов карьеров в массивах скальных тектонически-напряженных пород / А.А. Козырев, В.В. Рыбин, А.Л. Билин, В.А. Фокин, И.В. Мелик-Гайказов // Горный журнал. - 2010. - № 9. - с. 24 – 27.

9. Геомеханическое состояние массивов горных пород в бортах карьеров по данным инструментальных наблюдений / В.В. Рыбин, К.Н. Константинов, И.В. Данилов, А.А. Данилкин // Глубокие карьеры: Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием / Горн. ин-т КНЦ РАН. - Апатиты, 2012. - С. 382-388.

10. Руководство по измерению напряжений в массиве скальных пород методом разгрузки (вариант торцевых измерений) / И.А. Турчанинов, Г.А. Марков, В.И. Иванов; КФ АН СССР, Горн. ин-т. – Апатиты, 1970.– 48 с.