

УДК 622.83:550.83

**ОЦЕНКА ПРИРОДНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ  
ПОРОДНОГО МАССИВА НА ПОДЗЕМНОМ РУДНИКЕ “НУРКАЗГАН”**

**А. В. Леонтьев<sup>1</sup>, А. Б. Макаров<sup>2</sup>, А. Ю. Тарасов<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,  
Красный проспект, 54, 630091, Новосибирск, Россия*

<sup>2</sup>*SRKConsulting (Russia),  
Кузнецкий мост, 4/3, 125009 Москва, Россия*

<sup>3</sup>*ТОО “Корпорация Казахмыс”,  
Пл. Metallургов, 1, 100600, Жезказган, Казахстан*

Рассмотрены результаты комплексной оценки природного напряженного состояния породного массива на подземном руднике “Нурказган”. Данные визуального обследования состояния подземных выработок, а также инструментальных определений компонент, действующих в массиве напряжений, свидетельствуют о том, что в пределах месторождения существует гидростатическое поле напряжений.

*Породный массив, напряженно-деформированное состояние массива, измерительный гидроразрыв, разрушение горных пород*

**ВВЕДЕНИЕ**

Один из крупнейших рудников корпорации “Казахмыс” – “Нурказган”, расположенный в Карагандинской области Казахстана, недалеко от г. Темиртау, открыт в январе 2003 г. По данным геологической разведки, рудные запасы “Нурказгана” способны обеспечить интенсивную добычу медной руды и золота в течение 40 лет и более. Проектная мощность рудника составляет 4 млн т руды в год.

Массив западного участка месторождения в центральной части рудного поля сложен кварцевыми диоритами первой фазы внедрения, гранодиоритами, гранодиорит-порфирами второй фазы и интрузивными брекчиями, завершающими образование массива [1]. Массив разбит сетью разрывных нарушений, к которым часто приурочены пострудные дайки диабазов.

Со второй фазой внедрения связан привнос рудных гидротермальных растворов меди, золота, серебра, молибдена и последующее их рудоотложение в интрузивных брекчиях кварцевых диоритов первой фазы внедрения. Основной рудный минерал — халькопирит, исполняет роль цемента брекчий, образуя гнезда, прожилки и просечки. Сульфидные медно-порфиновые золото-медные руды связаны со штокообразным телом гидротермально измененных интрузивных брекчий, повторяя его форму в целом. Рудная зона четких геологических границ не имеет. Они определяются только по результатам химических анализов.

Сплошное оруденение мощностью до 400 м в центральной части рудной зоны на флангах расщепляется на маломощные, постепенно выклинивающиеся рудные тела. Рудная залежь имеет вытянутую в субмеридиональном направлении форму протяженностью до 800 м при ширине до 400 м на горизонтах (+ 300 ÷ – 120) м с крутым падением (до 77°) на запад. Размах оруденения по падению — до 1360 м.

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЙ ГЛАВНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В МАССИВЕ

В соответствии с законом гравитации одно из главных напряжений действует в массиве вертикально и на глубине  $H$  определяется весом вышележащей толщи  $\sigma_v = \gamma H$ , где  $\gamma$  — средний удельный вес пород. Направления действия двух других главных напряжений в горизонтальной плоскости, как правило, связаны с геологическими структурами, в частности с простиранием и падением рудных залежей.

Методика М. В. Гзовского [2] позволяет кинематически реконструировать направления действия главных напряжений в массиве, опираясь на взаимное расположение сопряженных тектонических нарушений: наибольшие тектонические напряжения действуют по биссектрисе острого угла между ними. По тектоническим разломам на геологической карте района месторождения “Нурказган” (рис. 1) находим, что доминирующим направлением действия наибольших горизонтальных напряжений является субмеридиональное (С–Ю). Это позволяет предположить, что в массиве рудника наибольшие горизонтальные тектонические напряжения действуют по простиранию рудного тела в направлении (С–Ю), а наименьшие — вкрест простирания, по падению залежи в направлении (З–В).

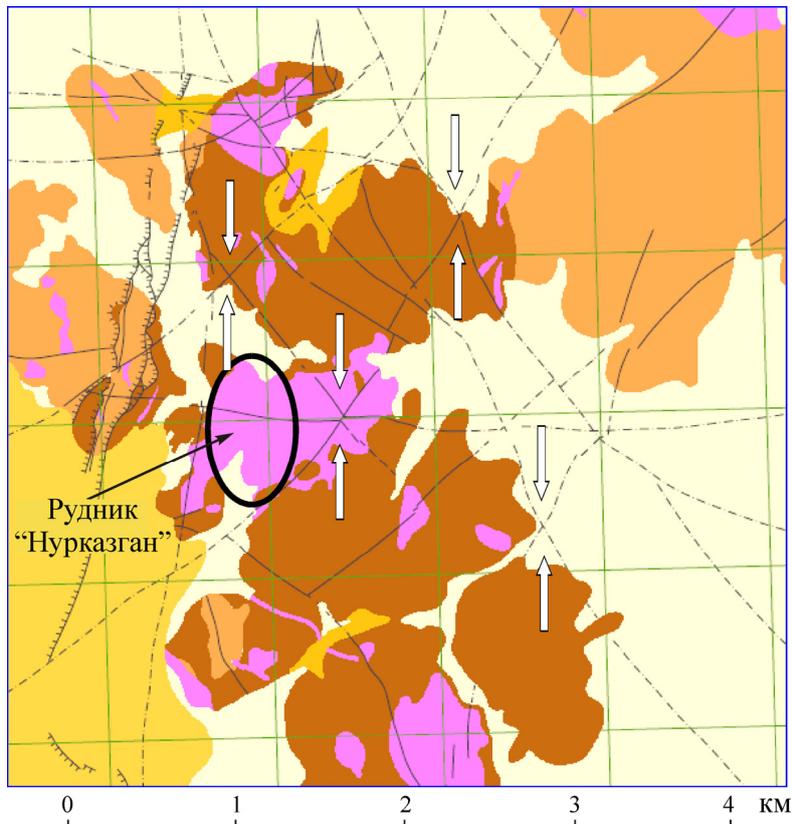


Рис. 1. Геологическая карта района месторождения с тектоническими разломами (сплошные линии — установленные; штриховые — предполагаемые) и реконструированным направлением действия тектонических напряжений

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИРОДНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

При инструментальном определении параметров природного напряженного состояния массива на руднике “Нурказган” использован классический вариант измерительного гидроразрыва, созданного в ИГД СО РАН измерительно-вычислительного комплекса (ИВК) “Гидроразрыв” [3–5]. Данный комплекс при помощи гибких напорных шлангов высокого давления позволяет при благоприятных обстоятельствах в течение рабочей смены проводить 10–12 измерений с суммарным расходом масла 3–5 л. Интервалы измерительных скважин для осуществления гидроразрыва, свободные от природных трещин, предварительно устанавливаются с помощью телевизионной аппаратуры исследования скважин (ТАИС).

Экспериментальный участок выбран на гор. 185 м с учетом максимального удаления от существующих выработанных пространств и максимального приближения к рудному телу (рис. 2, 3). Здесь в апреле 2011 г. пробурено 10 скважин глубиной 15 м и диаметром 59 мм, в которых проведено 138 измерений.

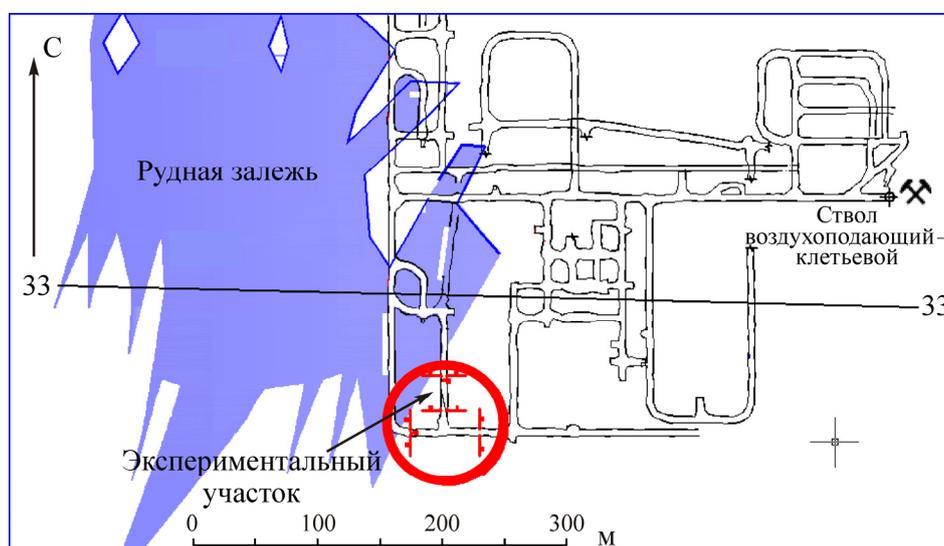


Рис. 2. Расположение экспериментального участка по определению напряжений на гор. 185 м и линия разреза 33

Ориентация измерительных скважин задана в соответствии с направлением действия в массиве главных напряжений:

- горизонтальные в направлении З–В (по падению залежи) — по направлению действия наименьших горизонтальных напряжений (№ 1–4);
- горизонтальные в направлении С–Ю (по простирацию рудной залежи) — по направлению действия наибольших горизонтальных напряжений (№ 5–8);
- вертикальные — по направлению действия гравитационного давления  $\gamma H$  (№ 9, 10).

В горизонтальных скважинах, пробуренных в направлении З–В по падению залежи, определялись вертикальные и горизонтальные напряжения по простирацию рудной залежи; в пробуренных в направлении С–Ю по простирацию залежи — вертикальные и горизонтальные напряжения по падению рудной залежи.

Таким образом, для определения главных компонент природного напряженного состояния массива выполнены следующие измерения:

- вертикальных напряжений — из горизонтальных скважин № 1–8;

- горизонтальных напряжений по простиранию залежи — из горизонтальных скважин № 1–4 и вертикальных скважин № 9 и № 10;
- горизонтальных напряжений по падению залежи — из горизонтальных скважин № 5–8 и вертикальных скважин № 9 и № 10.

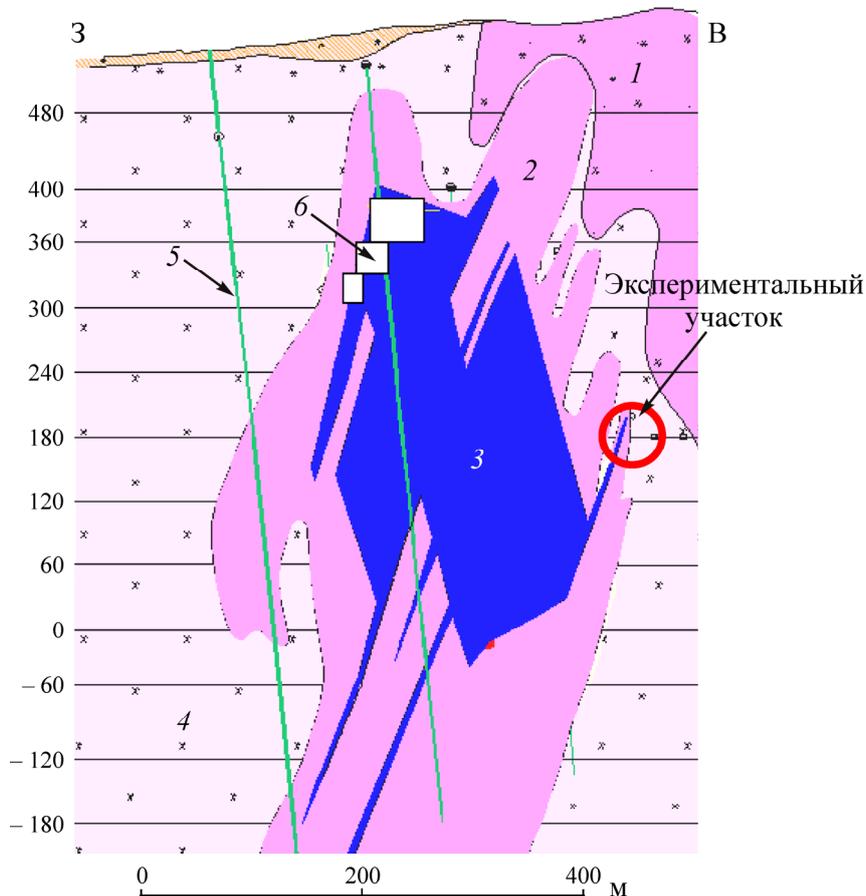


Рис. 3. Расположение экспериментального участка по определению напряжений в разрезе 33: 1 — гранодиорит; 2 — интрузивная брекчия; 3 — руда (рудная брекчия); 4 — кварцевый диорит; 5 — дайки диабазов; 6 — отработанные подэтажи 360, 325, 305 м

Чтобы идентифицировать вертикальные напряжения, вычислим гравитационное давление налегающей толщи  $\gamma H$  на участке определения напряжений. Отметка земной поверхности в данном районе 560 м. Отметки измерительных скважин 180 м. Следовательно, глубина, на которой проводились измерения, 380 м. Средний удельный вес пород  $2.76 \text{ т/м}^3$ , тогда  $\gamma H = 10.49 \text{ МПа}$ .

Сводные данные действующих вертикальных напряжений, полученные в скважинах № 1–8, показаны на рис. 4. Для сопоставления экспериментальных данных с аналитическим решением Кирша глубина установки измерительного зонда от устья скважин пересчитана в относительную координату  $r/R$ , где  $R$  — приведенный радиус выработки ( $R = \sqrt{S/\pi}$ ), здесь  $S$  — площадь поперечного сечения выработки);  $r$  — текущий радиус от центра выработки до места выполнения теста гидроразрыва.

Существенные отклонения установленных вертикальных напряжений от их значений по аналитическому решению Кирша наблюдаются вблизи контура выработок при  $r/R = 1.0–2.5$ , что, скорее всего, объясняется разгрузкой массива в приконтурной зоне и подвижками блоков по

имеющимся трещинам в выработку. Кроме того, с помощью программы Unwedge можно показать, что при системах трещин, встречающихся на руднике “Нурказган”, область неупругого поведения массива может распространяться от контура выработки в глубь массива до 2.5 м, т. е. до  $r/R = 1.8$ .

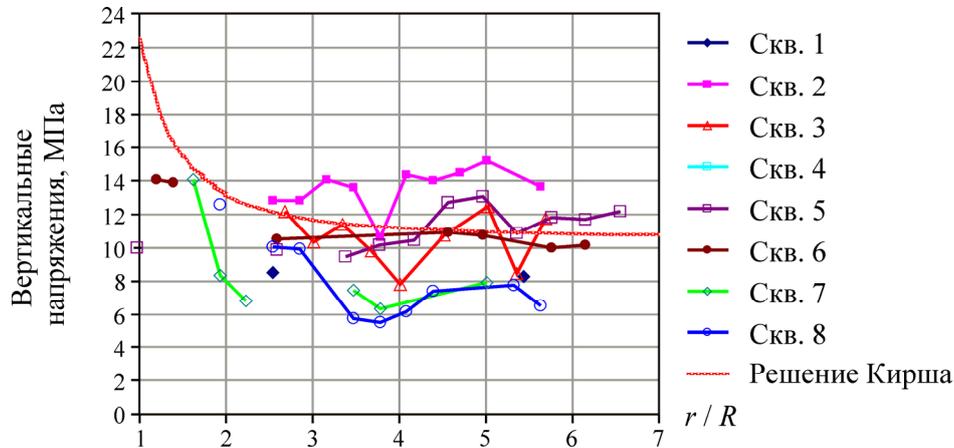


Рис. 4. Сводные данные вертикальных напряжений

В итоговую выборку вертикальных напряжений вошли 54 значения. Плотность их распределения близка к нормальному закону. Среднее значение вертикальных напряжений  $\sigma_v = 10.60$  МПа со среднеквадратичным отклонением 2.58 МПа (коэффициент вариации 24 %).

Соотношение  $\sigma_v / \gamma H = 1.01$ , т. е. отклонение среднего значения установленных вертикальных напряжений в массиве  $\sigma_v$  от гравитационного давления налегающей толщи  $\gamma H$  составляет 1 %, хотя разброс отдельных значений достаточно широк. Это свидетельствует о неоднородности напряженного состояния массива, вызванной его блочной структурой. Степень данной неоднородности характеризуется существенным (хотя и обычным для горной практики) коэффициентом вариации 24 %.

Как показал последующий анализ, вертикальные напряжения являются наибольшими среди трех главных компонент природного поля напряжений. Поэтому им присвоен ранг максимальных. Оценим значения действующих горизонтальных напряжений. Они приведены на рис. 5, а их статистические характеристики — в таблице.

#### Значения горизонтальных напряжений

Параметр	Направления действующих горизонтальных напряжений	
	С–Ю по простиранию	З–В по падению
Ранг напряжений	Промежуточные $\sigma_2$	Минимальные $\sigma_3$
Среднее значение $\sigma$ , МПа	$\sigma_2 = 9.34$	$\sigma_3 = 8.74$
Стандартное отклонение $Sd$ , МПа	$Sd_2 = 0.78$	$Sd_3 = 1.19$
Коэффициент вариации $V$ , %	8	14
Количество измерений $n$	$n_2 = 28$	$n_3 = 42$

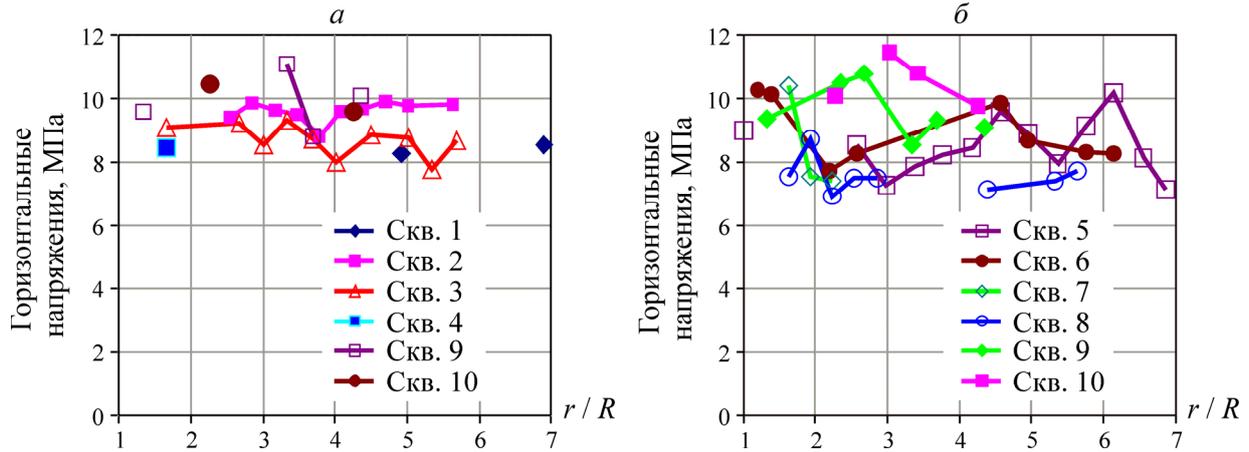


Рис. 5. Установленные горизонтальные напряжения, действующие по простиранию (а) и по падению залежи (б)

Статистический анализ полученных результатов по t-критерию Стьюдента показал, что при 99 %-м уровне значимости следует отвергнуть нулевую гипотезу о равенстве средних значений и принять альтернативную гипотезу о статистически значимом (не случайном) различии горизонтальных напряжений, действующих по простиранию и по падению залежи. По экспериментальным данным на гор. 185 м рудника “Нурказган” горизонтальные напряжения, действующие по простиранию рудной залежи в направлении С–Ю, являются промежуточными и равны  $\sigma_2 = 9.34$  МПа. Минимальные напряжения действуют вкрест простирания по падению залежи в направлении З–В и равны  $\sigma_3 = 8.74$  МПа.

Сравнение полученных экспериментально напряжений, действующих вблизи контура выработок, с расчетными значениями по аналитическому решению Кирша (с учетом крупноблочной структуры массива) можно признать удовлетворительным в глубине массива при  $r/R > 2.0 \div 3.0$  (рис. 6). Следовательно, установленные значения компонент природного поля напряжений представляются вполне реалистичными.

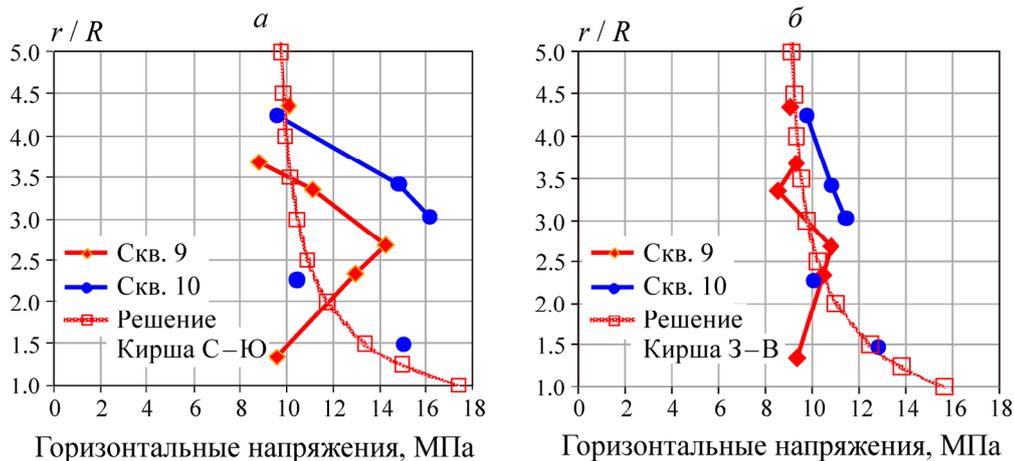


Рис. 6. Сопоставление горизонтальных напряжений по простиранию (а) и вкрест простирания (б) залежи, установленных в вертикальных скважинах, с их расчетными значениями по решению Кирша

Данное заключение подтверждается результатами визуальных наблюдений за проявлениями горного давления в подземных выработках и простейшими полевыми экспериментами, а именно:

— в действующих и строящихся горизонтальных выработках на отметках от + 360 до + 185 м на глубинах 200–380 м отсутствуют проявления горного давления в виде раздавливания пород на контуре выработок; редко встречающиеся вывалы горной массы с кровли и бортов выработок обусловлены вскрытием неблагоприятно ориентированных крупных трещин;

— кровля и борта горизонтальных выработок разного направления (по простиранию и вкрест простирания рудного тела) сохраняют примерно одинаковую устойчивость; переборы сечения выработок после вывалов горной массы по трещинам в кровле и бортах встречаются с равной частотой;

— при бурении геологоразведочных скважин до глубины 1200 м отсутствует эффект дискования керна.

### МОДЕЛЬ ПРИРОДНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА НА РУДНИКЕ “НУРКАЗГАН”

Рассмотрим два возможных варианта модели природного поля напряжений на руднике “Нурказган”:

Модель <i>A</i>	Модель <i>B</i>
$\sigma_1 = \gamma H, \quad \sigma_2 = \lambda_2 \gamma H, \quad \sigma_3 = \lambda_3 \gamma H,$ где $\lambda_2 = \sigma_2 / \sigma_1; \lambda_3 = \sigma_3 / \sigma_1; \gamma = 0.0276 \text{ МН/м}^3$	$\sigma_1 = \gamma H, \quad \sigma_2 = \xi \gamma H + T, \quad \sigma_3 = \xi \gamma H + \psi T,$ где $\xi = \nu / (1 - \nu); T = \sigma_2 - \xi \gamma H; \psi = (\sigma_3 - \xi \gamma H) / T$
По результатам экспериментальных исследований:	
$\lambda_2 = 0.88 \sim 0.9, \quad \lambda_3 = 0.82 \sim 0.8$	$\nu = 0.22, \quad \xi = 0.28, \quad T = 6.35 \text{ МПа}, \quad \psi = 0.91 \sim 0.9$

**П р и м е ч а н и е.**  $\gamma$  — средний удельный вес пород налегающей толщи;  $\lambda_2, \lambda_3$  — коэффициенты бокового давления соответственно по простиранию залежи в направлении С–Ю и по падению залежи в направлении З–В;  $\nu$  — коэффициент Пуассона (по данным лабораторных испытаний образцов керна из измерительных скважин);  $\xi$  — коэффициент бокового распора по А. Н. Диннику;  $T$  — тектонические напряжения;  $\psi$  — эмпирический коэффициент, характеризующий боковой распор вкрест действия тектонических напряжений.

Модель *A* (рис. 7) предполагает, что тектонические напряжения вблизи земной поверхности равны нулю, а с глубиной нарастают с постоянными коэффициентами  $\lambda_2$  и  $\lambda_3$ .

В модели *B* (рис. 7) принято, что тектонические напряжения являются постоянными, а увеличение горизонтальных напряжений с глубиной связано только с ростом бокового распора  $\xi \gamma H$  (по А. Н. Диннику) от возрастающего гравитационного давления налегающей толщи  $\gamma H$ .

В сравнении с моделью *B* модель *A* предсказывает более высокие значения горизонтальных напряжений на глубинах 800–1000 м. Для обоснованного выбора наиболее реалистичной для данного рудника модели природного поля напряжений необходимы измерения действующих напряжений на большой глубине. Воспользуемся альтернативными сведениями из анализа состояния породного массива при проходке ствола воздухоподающий–клетевой, который в настоящее время является самой глубокой выработкой на руднике “Нурказган”. Визуальные обследования состояния стенок призабойной (не закрепленной бетоном) части ствола проводились систематически при глубине забоя от 800 до 985 м.

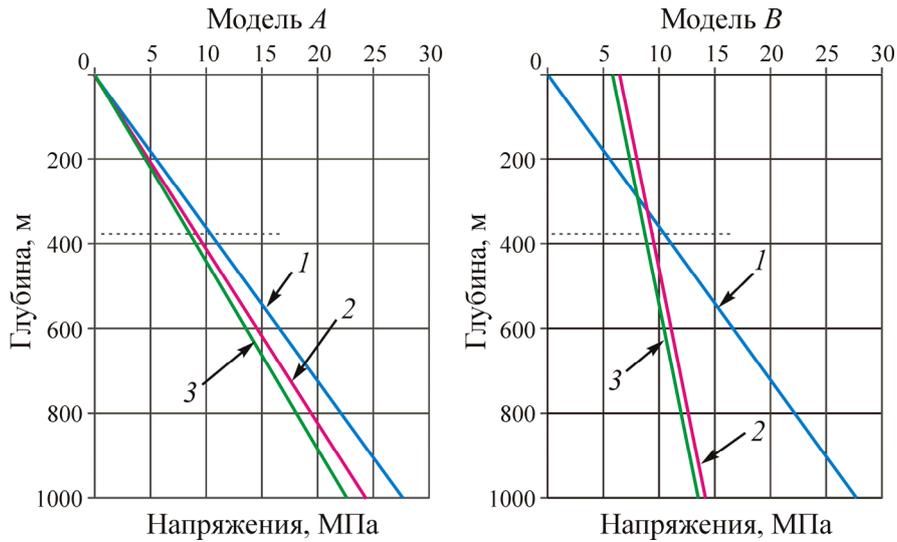


Рис. 7. Действующие природные напряжения на руднике “Нурказган”: 1 — вертикальные, 2 — горизонтальные; 3 — вкрест простирания залежи; пунктиром обозначена глубина  $H = 380$  м, на которой проведены определения напряжений методом гидроразрыва скважин

В забое и незакрепленных стенках шахтного ствола на указанных глубинах отсутствовали признаки разрушения пород под действием повышенных напряжений; во всем интервале глубин не наблюдалось динамических признаков проявления повышенных напряжений — тресков, щелчков, ударов в массиве. Периодически происходили вывалы блоков породы по неблагоприятно ориентированным трещинам.

В ноябре 2011 г. на отметке  $-420$  м при проходке камеры натяжения хвостовых канатов из ствола на юг на глубине  $985$  м также не наблюдалось явных проявлений горного давления. Однако при проходке высечки из ствола на запад зафиксирован сильный треск в северном борту и в кровле высечки. Кровля высечки после вывала приняла вид шатра высотой (сверх проекта) до  $1.7$  м. Мощность вывала раздавленных пород в северном борту высечки составила около  $2$  м. Данные факты (проявления горного давления в выработке с направлением З–В и их отсутствие в выработке с направлением С–Ю) явно указывают на то, что напряжения по простиранию залежи (С–Ю) больше, чем по падению (З–В).

В [6] предложена методика расчета коэффициентов бокового давления по фактам проявления горного давления в выработках. Если разрушение горных пород отмечается в бортах выработки, то коэффициент бокового давления вкрест оси выработки оценивается по формуле

$$\lambda \leq 3 - \frac{\sigma_m}{\gamma H}.$$

Если разрушение горных пород происходит в кровле выработки, то

$$\lambda \geq \frac{1}{3} \left( \frac{\sigma_m}{\gamma H} - 1 \right),$$

где  $\sigma_m = 48$  МПа — прочность массива на сжатие, установленная по результатам исследований для рудника “Нурказган”. Тогда с учетом фактов проявления горного давления в кровле и бортах высечки можно получить следующие значения геомеханических параметров состояния массива на больших глубинах:

$$0.92 \leq \lambda_2 \leq 1.23,$$

$$25 \text{ МПа} \leq \sigma_2 \leq 34 \text{ МПа}.$$

Следовательно, из двух рассмотренных возможных моделей природного напряженного состояния массива для рудника “Нурказган” более реалистичной представляется модель *A* с постоянными коэффициентами бокового давления.

### ВЫВОДЫ

На основе анализа результатов визуального обследования состояния подземных выработок рудника “Нурказган”, включая призабойную часть ствола на глубинах до 985 м от поверхности, а также данных инструментальных определений компонент действующих в массиве напряжений можно отметить следующее:

— в массиве месторождения “Нурказган” отсутствуют высокие горизонтальные напряжения тектонического происхождения;

— изометрия наблюдаемых проявлений горного давления в выработках разного направления, а также полученные экспериментально оценки главных напряжений свидетельствуют о близости природного поля напряжений к гидростатическому напряженному состоянию массива;

— установленная модель природного поля напряжений на месторождении “Нурказган” имеет вид:  $\sigma_1 = \gamma H$ ;  $\sigma_2 = 0.88\gamma H$  и  $\sigma_3 = 0.82\gamma H$ .

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Отчет** по поисково-разведочным работам на месторождении “Нурказган” с подсчетом запасов по состоянию на 01.07.2004. — Т. 4. — АО Жезказган-геология; ГР № 6-96-41/1. 2005.
2. **Гзовский М. В.** Основы тектонофизики. — М.: Наука, 1975.
3. **Леонтьев А. В., Попов С. Н.** Опыт практического применения измерительного гидроразрыва // Горн. журн. — 2003. — № 3.
4. **Современная геодинамика** массива горных пород верхней части литосферы: истоки, параметры, воздействие на объекты недропользования / отв. ред. чл.-кор. РАН М. Д. Новопашин. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008.
5. **Деструкция** земной коры и процессы самоорганизации в областях сильного техногенного воздействия / отв. ред. акад. Н. Н. Мельников. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012.
6. **Макаров А. Б.** Практическая геомеханика. — М.: Горная книга, 2006.

*Поступила в редакцию 7/V 2013*