



**ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ  
ПОДКАРЬЕРНОГО МАССИВА И НАБЛЮДАТЕЛЬНОЙ ВЫРАБОТКИ  
В ПРОЦЕССЕ РАЗВИТИЯ ОЧИСТНЫХ РАБОТ**

**В. Д. Барышников, Д. В. Барышников, Л. Н. Гахова**

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: v-baryshnikov@yandex.ru,  
Красный проспект 54, г. Новосибирск 630091, Россия*

Выполнена прогнозная оценка напряженно-деформированного состояния подкарьерного массива при подземной отработке запасов на руднике “Интернациональный” АК “Алроса”. Для условий распределения напряжений в нетронутым массиве, в соответствии с гипотезой А. Гейма и А. Н. Динника, установлены особенности формирования напряжений в рудной потолочине и наблюдательной выработке геомеханического мониторинга на различных этапах ведения горных работ. Дана верхняя оценка величин напряжений в окрестности наблюдательной выработки.

*Карьер, подкарьерная потолочина, напряженное состояние, запредельное деформирование*

**PREDICTIVE ASSESSMENT OF THE STRESS STATE OF  
UNDEROPENCAST ROCK MASS AND OBSERVATION WORKING  
IN THE DEVELOPMENT OF STOPING OPERATIONS**

**V. D. Baryshnikov, D. V. Baryshnikov, and L. N. Gakhova**

*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
E-mail: vbar@isd.nsc.ru, Krasny pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia*

Predictive assessment of the stress-strain state of underopencast rock mass was made during underground mining at the Internatsionalnaya mine of PJSC Alrosa. For the conditions of stress distribution in an intact rock mass, in accordance with the hypothesis of A. Geim and A. N. Dinnik, the features of stress formation in ore ceiling and observation working of geomechanical monitoring at various mining stages were determined. An upper estimate is given for the stress values in the vicinity of the observation working.

*Opencast, ore ceiling, stress state, post-limiting deformation*

Переход от открытой к подземной разработке месторождения требует геомеханического обоснования технических решений по оценке состояния подкарьерного массива и его изменений в процессе развития горных работ [1]. Для обеспечения безопасности горных работ в сложных гидрогеомеханических условиях под дном карьера планируется оставление предохранительного целика (рудной потолочины), размеры которого определяются с учетом особенностей формирования напряженно-деформированного состояния (НДС) подкарьерного массива.

Ниже приведены результаты геомеханического анализа состояния рудного массива при выемке подкарьерных запасов кимберлитовой трубки “Интернациональная” АК “АЛРОСА”, представляющей собой вертикальное рудное тело овальной формы поперечного сечения. По глубине месторождение разделяется на этажи (блоки) мощностью 90 м. Отработку подкарьер-

ных запасов предполагается осуществлять горизонтальными слоями высотой 4–5 м по камерно-целиковой схеме заходками шириной 5 м с закладкой выработанного пространства твердеющими смесями.

Цель данной работы — прогнозная оценка НДС рудного предохранительного целика для обеспечения безопасных условий отработки месторождения. Для изучения особенностей формирования НДС переходной зоны наиболее эффективными являются численные методы, позволяющие оценить возможные варианты ведения очистных работ и установить закономерности изменения НДС в процессе отработки запасов [2, 3]. Достоверность прогнозных оценок определяется надежностью исходных данных и прежде всего параметров напряженного состояния нетронутого массива. Численное моделирование НДС подкарьерного массива выполнено при отработке разрезного слоя и формировании потолочины толщиной 20 м с последующей отработкой нижележащего блока 1 [4]. Для решения задач о НДС горного массива в процессе отработки использовался метод граничных интегральных уравнений [3, 4].

Исходное напряженное состояние массива горных пород принято  $\sigma_y^0 = -\gamma H$ ,  $\sigma_x^0 = -\lambda\gamma H$ , где  $\sigma_y^0$ ,  $\sigma_x^0$  — соответственно, вертикальная и горизонтальная компоненты тензора напряжений;  $\lambda$  — коэффициент бокового распора;  $\gamma$  — объемный вес пород;  $H$  — глубина разработки. Так как экспериментальные данные о параметрах естественного поля напряжений на отметках подкарьерного массива отсутствуют, расчеты выполнялись для двух вариантов бокового отпора:  $\lambda = 1$  (гипотеза Гейма) и  $\lambda = 0.33$  (гипотеза Динника). В расчетах приняты модуль деформации подкарьерного массива  $E = 7.5$  ГПа и коэффициент Пуассона  $\nu = 0.25$  [5]. Анализ результатов проводится по численным значениям компонент тензора напряжений ( $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ).

При боковом распоре  $\lambda = 1$  под дном отработанного карьера (глубина от поверхности составляет 315 м) сформировалась зона повышенных горизонтальных сжимающих напряжений, достигающих на контуре дна карьера величины до  $\sigma_x = -14$  МПа (рис. 1а). При этом отмечается разгрузка от вертикальных напряжений при  $\sigma_y = 0$  МПа на его контуре (рис. 1б).

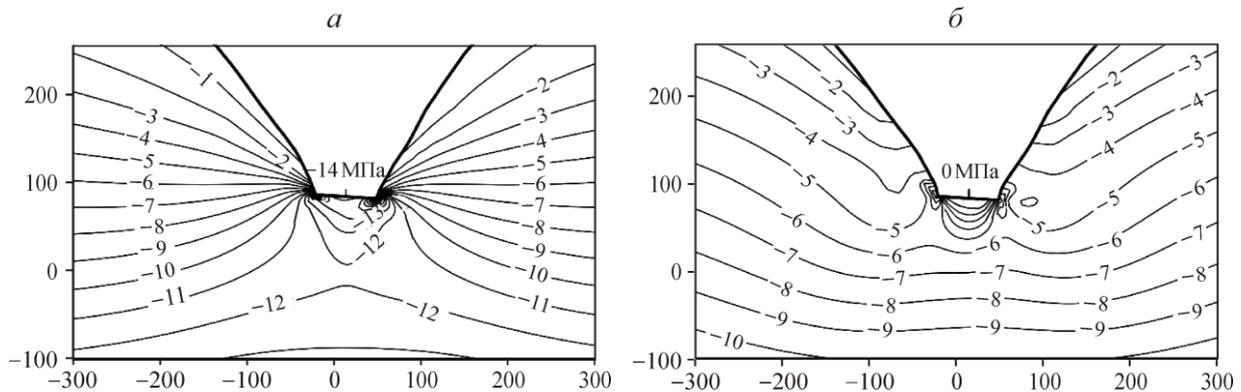


Рис. 1. Напряженное состояние в окрестности дна карьера: а —  $\sigma_x$ ; б —  $\sigma_y$ ;  $\lambda = 1$

На рис. 2 приведены величины напряжений в подкарьерном массиве при наличии 35-метровой толщи обводненных осыпей (отм. +120 м). Анализ результатов свидетельствует об уменьшении  $\sigma_x$  до 11 МПа и увеличении сжатия  $\sigma_y$  до -1 МПа.

После отработки блока 1 при практически полной разгрузке от вертикальных напряжений горизонтальные напряжения  $\sigma_x$  составили около 32 МПа (рис. 3), что значительно превышает прочность рудного массива на одноосное сжатие ( $\sigma_{сж} \approx 12-14$  МПа). При  $\lambda = 0.33$  (гипотеза Динника) горизонтальные напряжения в целике составляют около 10 МПа.

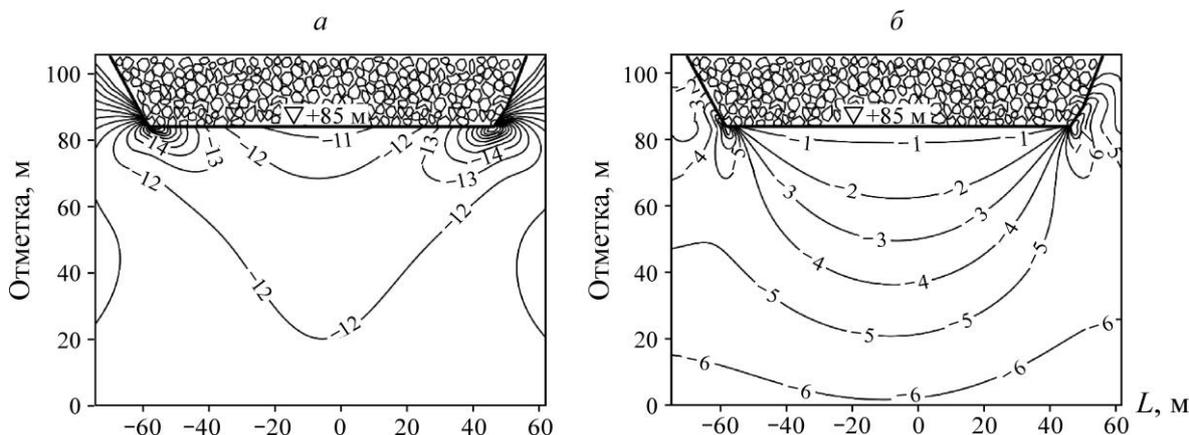


Рис. 2. Напряженное состояние (МПа) в подкарьерном массиве: *a* — горизонтальные напряжения  $\sigma_x$ ; *б* — вертикальные напряжения  $\sigma_y$

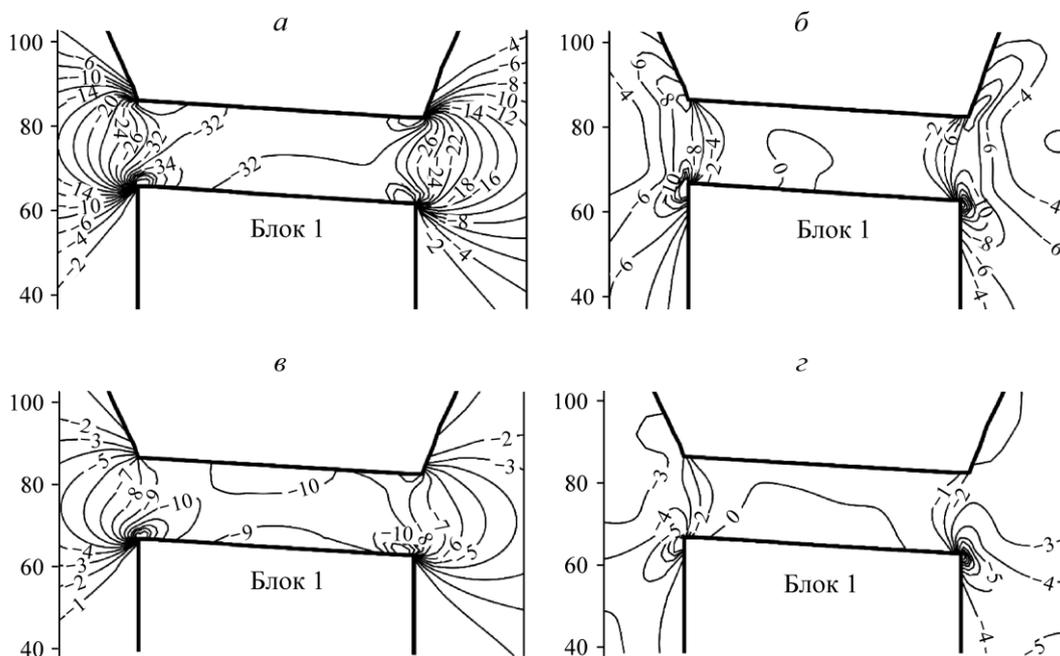


Рис. 3. Напряженное состояние в подкарьерном массиве после отработки блока № 1 при потолочине высотой 20 м для  $\lambda = 1$  (*a, б*) и  $\lambda = 0.33$  (*в, г*):  $\sigma_x$  (*a, в*) и  $\sigma_y$  (*б, г*)

Наличие водного объекта на дне карьера требует обязательного контроля развития гидрогеомеханической ситуации в подкарьерном массиве [4, 6, 7]. Наиболее эффективный контроль НДС возможен из наблюдательной выработки, пройденной в рудной потолочине и расположенной выше кровли обрабатываемого блока 1. Прогноз напряженного состояния в окрестности наблюдательной выработки в процессе развития горных работ выполнен для  $\lambda = 1$ , что обеспечивает оценку сверху.

На рис. 4 приведены изолинии напряжений в окрестности наблюдательной выработки после ее проходки на удалении 20 м от дна карьера. В кровле зона горизонтальных напряжений, превышающих прочность массива на одноосное сжатие, распространяется на глубину, сопоставимую с шириной выработки (на контуре  $\sigma_x = -18.3$  МПа). В боках зона растягивающих вертикальных напряжений достигает глубины около 1 м, а напряжение на контуре  $\sigma_y = -6.2$  МПа.

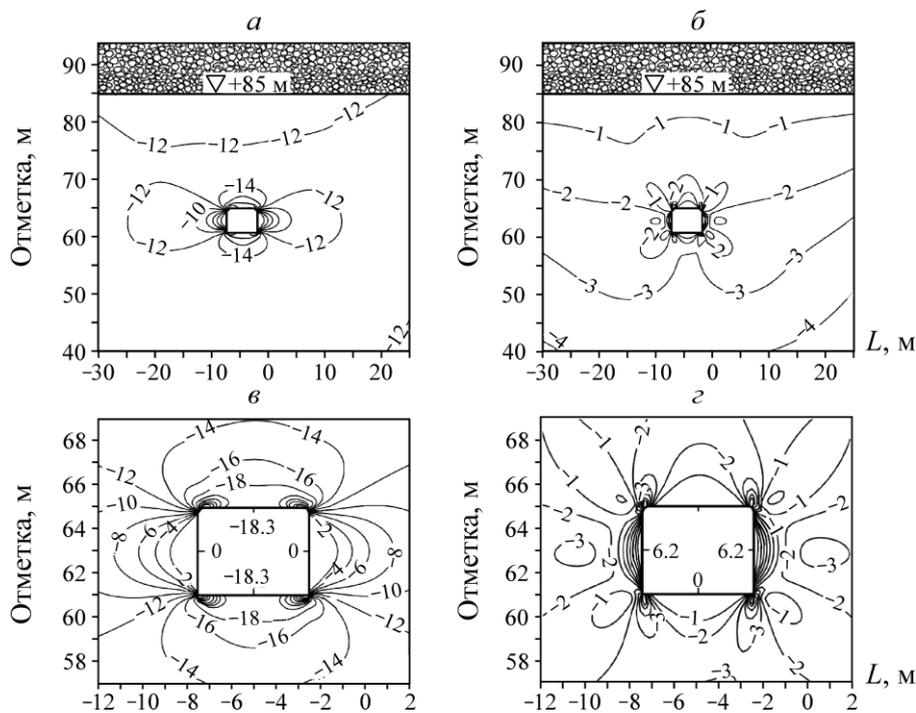


Рис. 4. Напряженное состояние (МПа) в подкарьерном массиве при размещении выработки в отм. +61 ÷ +65 м: а, в — горизонтальные напряжения  $\sigma_x$ ; б, г — вертикальные напряжения  $\sigma_y$

На рис. 5 показаны изолинии напряжений в подкарьерном массиве после полной отработки блока 1 при мощности рудной потолочины 35 м (отм. +50 м). Полученные результаты свидетельствуют о предельном состоянии потолочины по критерию прочности на одноосное сжатие при практически полной разгрузке от вертикальных напряжений. Горизонтальные сжимающие напряжения на контуре кровли достигают значений  $\sigma_x = -28.3$  МПа (рис. 5а, в), а вертикальные растягивающие напряжения —  $\sigma_y = 13$  МПа (рис. 5б, г). Глубина зоны растяжения в боках выработки составляет половину ее ширины.

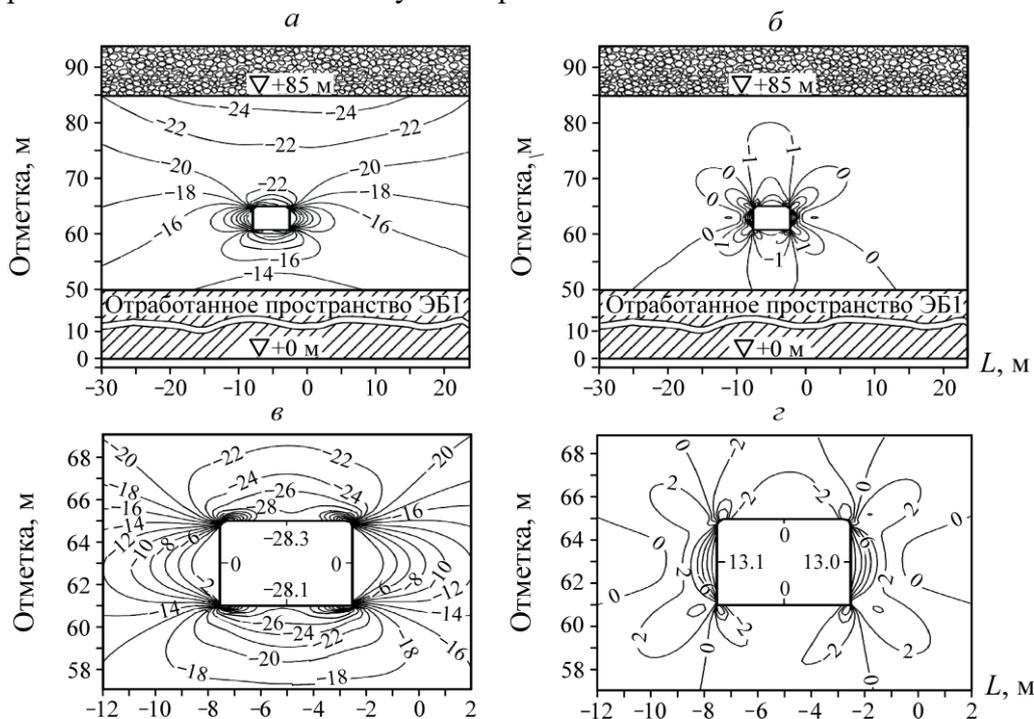


Рис. 5. Напряженное состояние (МПа) в окрестности выработки в отм. +61 ÷ +65 м после отработки ЭБ 1: а, в — горизонтальные напряжения  $\sigma_x$ ; б, г — вертикальные напряжения  $\sigma_y$

## ВЫВОДЫ

При распределении исходного поля напряжений в соответствии с гипотезами А. Гейма и А. Н. Динника установлены особенности формирования напряженного состояния в подкарьерном массиве рудника “Интернациональный”.

Предельное состояние 20-метровой рудной потолочины при  $\lambda = 1$  отмечается после полной отработки блока 1. При этом горизонтальные сжимающие напряжения в потолочине достигают величины около 30 МПа при полной разгрузке от вертикальных напряжений. При  $\lambda = 0.33$  горизонтальные сжимающие напряжения в потолочине составляют около 10 МПа, что значительно меньше прочности рудного массива на одноосное сжатие ( $12 \div 14$  МПа).

Напряжения в окрестности наблюдательной выработки для проведения мониторинга рудной потолочины, пройденной на удалении 20 м от дна карьера, превышают прочностные свойства рудного массива при  $\lambda = 1$ . Зона неупругих деформаций в кровле достигает глубины, сопоставимой с шириной выработки. Горизонтальные напряжения на контуре кровли составляют  $\sigma_x = -18.3$  МПа, в боках выработки вертикальные растягивающие напряжения распространяются на глубину до 1 м, а на контуре составляют  $\sigma_y = -6.2$  МПа. При полной отработке блока 1 сжимающие напряжения в кровле возрастают в 1.5 раза, достигая на контуре  $\sigma_x = -28.3$  МПа, вертикальные растягивающие напряжения в боках — почти в 2 раза до значений на контуре 13 МПа.

Для интерпретации результатов мониторинга в процессе развития очистных работ и последующей корректировки прогнозных оценок НДС подкарьерного массива с целью их учета при обосновании безопасности горных работ необходимо обязательное экспериментальное уточнение параметров исходного поля напряжений в подкарьерном массиве.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Kaplunov D. R., Kalmykov V. N., and Rynnikova M. V.** Combined Geotechnology, Moscow, Publishing House “Ore and Metals”, 2003, 560 pp. [**Каплунов Д. Р., Калмыков В. Н., Рыльникова М. В.** Комбинированная геотехнология. — М.: Издательский дом “Руда и металлы”, 2003. — 560 с.]
2. **Segerlind L.** Applied Finite Element Analysis, Moscow: Mir, 1979, 392 pp. [**Сегерлинд Л.** Применение метода конечных элементов. — М.: Мир, 1979, 392 с.]
3. **Crouch S. and Starfield A.** Boundary Element Method in Solid Mechanics, Moscow, Mir, 1987, 328 pp. [**Крауч С., Старфилд А.** Метод граничных элементов в механике твердого тела. — М.: Мир, 1987, 328 pp.]
4. **Baryshnikov V. D. and Gakhova L. N.** Formation of stress-strain state of the rock mass in the vicinity of mine workings when slicing method for mining steeply dipping ore bodies is used, Fundamental and Applied Mining Science, 2017, vol. 4, no. 2, pp. 32–36. [**Барышников В. Д., Гахова Л. Н.** Формирование напряжено-деформированного состояния массива в окрестности горных выработок при слоевой системе разработки крутопадающих рудных тел // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2017. — Т. 4. — № 2. — С. 32–36.]
5. **Konovalev V. Ya.** Handbook of physical and mechanical properties of rocks of Yakutian diamond deposits, Novosibirsk, Institute of Mining, SB RAS, 2012, 276 pp. [**Коноваленко В. Я.** Справочник физико-механических свойств горных пород алмазных месторождений Якутии. — Новосибирск: Изд-во ИГД СО РАН, 2012. — 276 с.]
6. **Instruction** for the safe mining in the combined development of ore and non-ore mineral deposits: A collection of guidelines of mining supervision, Moscow, 1998, 17 pp. [**Инструкция** по безопасному ведению горных работ при комбинированной (совмещенной) разработке рудных и не рудных месторождений полезных ископаемых: сборник руководящих материалов горнорудного надзора. — М.: 1998. — 17 с.]
7. **Baryakh A. A., Samodelkin N. A., and Pan'kov I. L.** Water-tight stratum failure under large-scale mining. Part I, Journal of Mining Science, 2012, vol. 48, no. 5, pp. 3–14. [**Барях А. А., Самоделькин Н. А., Паньков И. Л.** Разрушение водоупорных толщ при ведении крупномасштабных горных работ. Ч. 1 // ФТПРПИ. — 2012. — № 5. — С. 3–14.]