

УДК 539.3.01:622.834

**ВЛИЯНИЕ ЧАСТИЧНОГО ЗАТОПЛЕНИЯ КАРЬЕРА “АЙХАЛ”  
НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ  
РУДНОЙ ПОТОЛОЧИНЫ**

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

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,  
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

По результатам численного моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) массива и данных натурных наблюдений за его деформированием в окрестности выработок определены предельные значения критериальных параметров геомеханической оценки устойчивости конструктивных элементов системы разработки для условий подкарьерного массива рудника “Айхал”. С их использованием выполнена оценка НДС и осадок рудной потолочины с учетом текущего положения зеркала воды, заполняющей карьер. Дана прогнозная оценка изменений НДС потолочины и ее сдвижений при повышении зеркала воды.

*Напряжения, деформации, массив горных пород, водозащитная толща, карьер*

Защита подземных выработок рудника от затопления является одной из основных проблем переходной зоны от открытой к подземной разработке месторождения. Для контроля состояния водоупорных толщ (потолочин), призванных обеспечить безопасную отработку подкарьерных запасов, наряду с инструментальными методами оценки нарушений сплошности потолочины [1–4], используются методы строительной механики (решение задач об изгибе слоя) [4, 5] и математического моделирования, основанные на решении задач теории упругости [6–10].

Применение методов математического моделирования в комплексе с результатами натурных наблюдений за состоянием конструктивных элементов систем разработки позволяет установить закономерности перераспределения напряженно-деформированного состояния (НДС) потолочины при изменении горнотехнической ситуации в подкарьерном массиве и гидрологических условий в карьере. Ниже на примере анализа геомеханического состояния подкарьерной потолочины рудника “Айхал” АК “АЛРОСА” исследовано влияние на процесс ее деформирования таких факторов, как увлажнение заполняющей карьерное пространство породы и осыпей и повышение отметок зеркала воды в карьере.

**ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

Кимберлитовая трубка “Айхал” АК “АЛРОСА” расположена в районе многолетнемерзлых пород, мощность которых составляет 400–450 м. Вмещающие породы представлены глинисто-карбонатными отложениями с прослоями мергелей. Залегание слоев субгоризонтальное. На

глубине 120 м от поверхности рудное тело разделяется на две части: юго-западное рудное тело (ЮЗРТ) и северо-восточное рудное тело (СВРТ). Верхняя часть месторождения отработана карьером до максимальной глубины 325 м. Отметка дна карьера СВРТ + 205 м, а зумпфа + 194.5 м (рис. 1).

После завершения открытых работ была начата подземная отработка законтурных запасов в северо-восточном борту карьера с использованием карьерного пространства для размещения вскрывающих выработок и транспортировки руды. Прибортовой рудный массив в отм. + 330 ÷ + 192 м отработан с применением систем поэтажного обрушения.

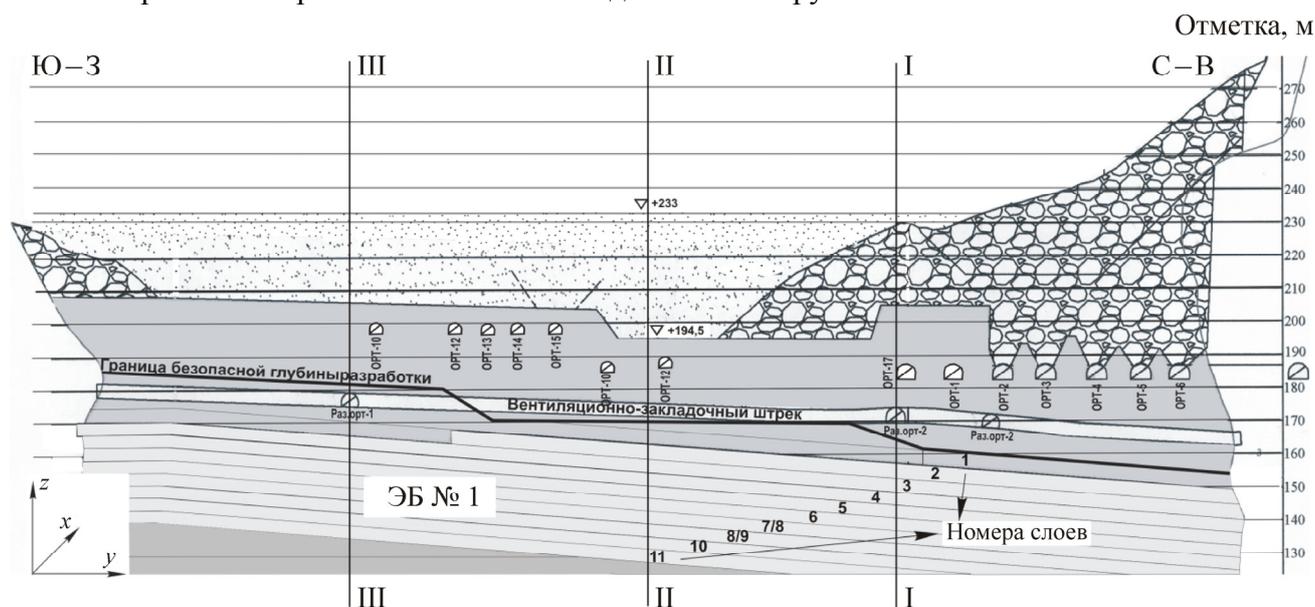


Рис. 1. Схема вертикального разреза по простиранию СВРТ (I–III — сечения)

В соответствии с проектными решениями часть подкарьерных запасов СВРТ до отм. + 150 м предлагалось отработать системой поэтажного обрушения с торцевым выпуском руды под обрушенными породами с последующим переходом на слоевую систему разработки. Однако при подготовке запасов в центральной части СВРТ (после принятия мер по осушению обводненных осыпей на дне карьера) произошел прорыв илов в горные выработки на отм. + 192 м. Поэтому дальнейшую отработку подкарьерных запасов по условиям безопасности было решено проводить с применением слоевой камерно-целиковой системы разработки и твердеющей закладки. Ведение закладочных работ в отработанном пространстве осуществляется через вентиляционно-закладочный штрек (ВЗШ), пройденный в рудном массиве в отм. + 163 ÷ + 175 м. Размер предохранительного целика над ним принят 8.5 м.

Защита горных выработок от прорыва обводненных илов со дна карьера и водопритоков, вызванных атмосферными осадками в весенне-летний период, предусматривается путем оставления рудной потолочины, проектная мощность которой 25 м. С целью снижения риска затопления горных выработок очистные работы под дном карьера начаты с отработки слоя № 3. После выемки разрезного слоя сформирована рудная потолочина толщиной 35 м. Для своевременного принятия мер по обеспечению безопасных условий отработки, ведение очистных работ сопровождается обязательным контролем гидрогеомеханического состояния рудной потолочины [7,8]. В последующем в восходящем порядке отработан слой № 2, затем работы продолжены в нисходящем порядке: отработывались слои № 4–11, т. е. весь эксплуатационный блок (ЭБ) № 1 (рис. 1, 2).

В настоящее время зумпф карьера заполнен пульпой, уровень которой в карьере из-за осыпей с бортов поднимается в среднем на 1 м в год. В ближайшие годы такая скорость накопления, предположительно, сохранится. Гидрогеологическими наблюдениями установлено, что подъем воды в карьере практически не сказывается на водопритоки в горные выработки гор. +163 ÷ +175 м, из чего следует, что между ВЗШ и зумпфом карьера нет прямой связи через водопродводящие трещины.

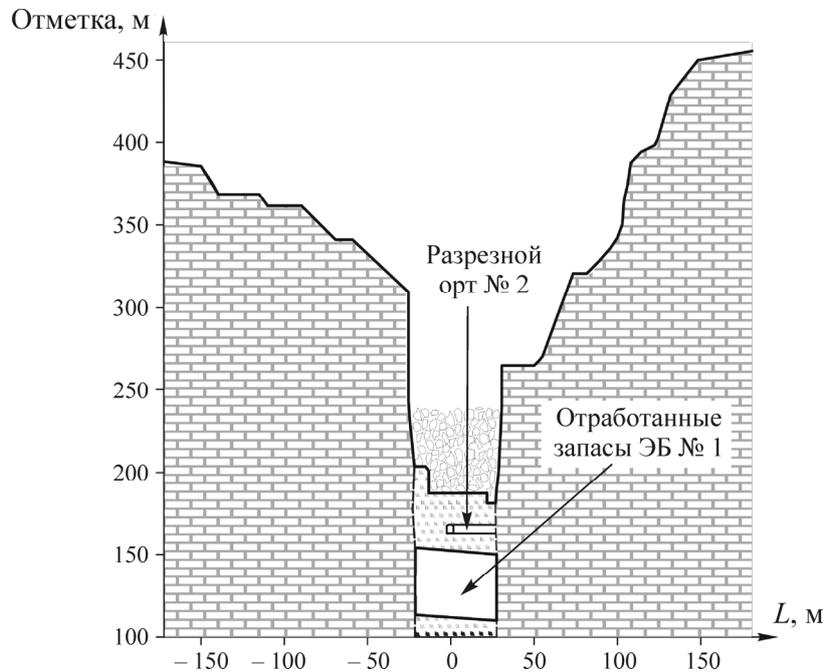


Рис. 2. Вертикальное сечение по разрезному орту № 2 (сечение I, рис. 1)

Интенсивность заполнения карьера водой определяет характер деформирования рудной потолочины, что наиболее точно можно оценить наблюдениями за ее сдвижением. Методы математического моделирования в комплексе с результатами натурных наблюдений позволят дать прогнозную оценку изменения напряженного состояния и сдвижений рудной потолочины с подъемом воды в карьере.

В рамках методического подхода по комплексному использованию экспериментальных и численных методов определения НДС искусственных и породных массивов [11], основанного на определении потенциальных зон запредельного деформирования горных пород и использовании различных критериев разрушения, выполнен анализ геомеханической ситуации в рудной потолочине после отработки подсечного слоя № 3. Оценка изменений НДС подкарьерного массива проведена по результатам численных расчетов с применением адаптированной к условиям карьера упругой модели, реализованной методом граничных интегральных уравнений [7–9, 12]. Поскольку размер СВРТ по длинной оси составляет около 350 м, а по короткой 30–70 м, правомерно использование в расчетах плоской модели. Задачи решались для реальной геометрии карьера. Прочностные свойства кимберлита приняты по результатам лабораторных испытаний керна:  $\sigma_{сж} \approx 10 \div 12$  МПа,  $\sigma_p \approx 1$  МПа. Исходное напряженное состояние массива горных пород принято следующее: вертикальные напряжения  $\sigma_z = \gamma H$ , горизонтальные  $\sigma_x = \lambda \gamma H$  для  $\lambda = 0.5$ .

На рис. 3а показано вертикальное сечение рудной потолочины вдоль разрезного орта № 2 на отм. + 165 м (сечение I, рис. 1) после полной отработки слоя № 3 с учетом реальной геометрии дна карьера в северо-восточной его части и приведены изолинии напряжений  $\sigma_s$ , позво-

ляющие воспользоваться критерием прочности Кулона–Мора для определения размеров области неупругих деформаций путем сравнения  $\sigma_s$  в окрестности обрабатываемой области со сцеплением массива  $C$  [11]:

$$\sigma_s = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2 \cos \varphi} + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \operatorname{tg} \varphi, \quad \sigma_s \leq C, \quad (1)$$

где  $\varphi$  — угол внутреннего трения;  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ .

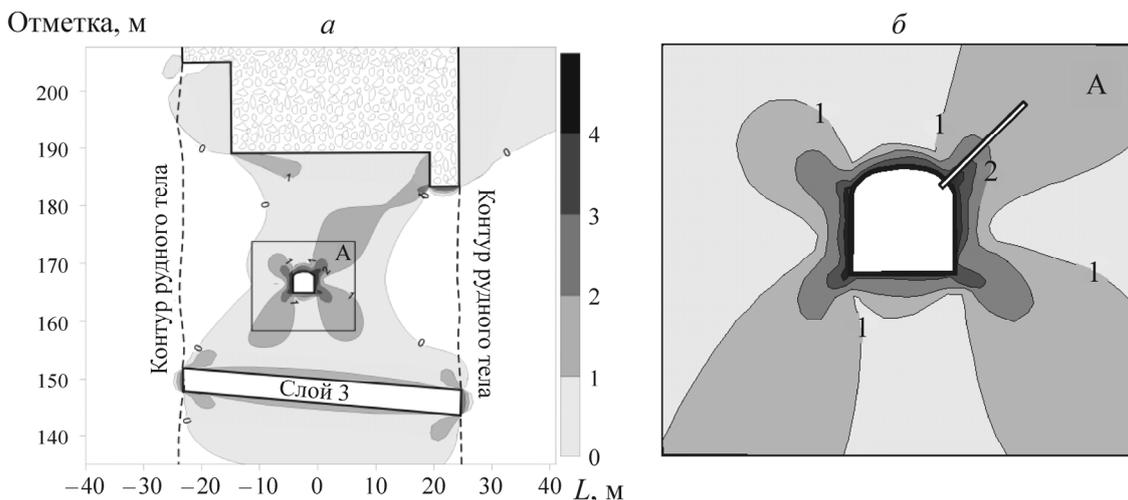


Рис. 3. Зоны неупругих деформаций в подкарьерном массиве после отработки слоя № 3 (а) и в окрестности ВЗШ с указанием местоположения контрольного шпура (б)

Результаты визуальных наблюдений за состоянием стенок контрольного шпура, пробуренного в кровле ВЗШ вблизи сопряжения с ортом № 2 (рис. 3б), показали, что зона расслоений в приконтурной части достигает глубины 1.7 м (рис. 4). Полученные результаты визуальных наблюдений и численного анализа позволили принять и использовать для условий подкарьерного массива рудника “Айхал” в качестве критической величину  $\sigma_s^k \approx 2$  МПа (см. рис. 3б).

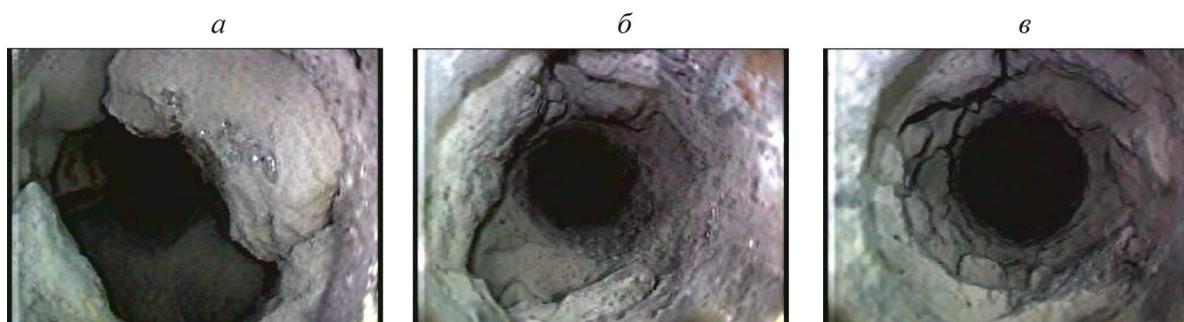


Рис. 4. Контур контрольного шпура в кровле ВЗШ на глубинах, см: а — 55; б — 155; в — 170

#### ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ НДС ПОДКАРЬЕРНОЙ ПОТОЛОЧИНЫ ПРИ ЗАПОЛНЕНИИ КАРЬЕРА ВОДОЙ

Расчеты выполнены с учетом реальной геометрии карьера и отработанного к концу 2012 г. подземного пространства. Пригрузка потолочины обусловлена заполнением карьера обрушен-

ной породой и ее увлажнением до отм. + 233 м. Дальнейший подъем зеркала воды на 10 м происходит над увлажненной до отм. 243 м породой.

Пригрузка потолочины от увлажнения обрушенных пород определялась из выражения [10]

$$P_z = \zeta\gamma_1 H_1 + (1 - \zeta)\gamma_2 H_2,$$

где  $H_1$  — мощность толщи обрушенных пород;  $H_2$  — мощность толщи увлажненных пород;  $\zeta$  — коэффициент разрыхления обрушенных пород ( $\zeta = 0.7$ );  $\gamma_1$  — объемный вес пород ( $0.027 \text{ МН/м}^3$ );  $\gamma_2$  — объемный вес воды ( $0.01 \text{ МН/м}^3$ ). Пригрузка при повышении зеркала воды на высоту  $H_3$ :  $P_v = \gamma_2 H_3$ .

Наиболее неблагоприятная геомеханическая ситуация по фактору НДС при подъеме зеркала воды может сложиться под зумпфом (сечение II, рис. 1) и в северо-восточной части подкарьерного пространства (сечение I, рис. 1), так как толщина потолочины здесь около 30 м, в то время как в юго-западной части — около 40 м (сечение III, рис. 1).

Анализ результатов расчетов показал следующее.

В потолочине под зумпфом горизонтальные напряжения  $\sigma_x$ , являющиеся определяющими в подкарьерной потолочине [7–9], не превышают прочность кимберлита на сжатие, за исключением кровли ВЗШ и части массива на юго-восточном участке дна карьера (рис. 5а).

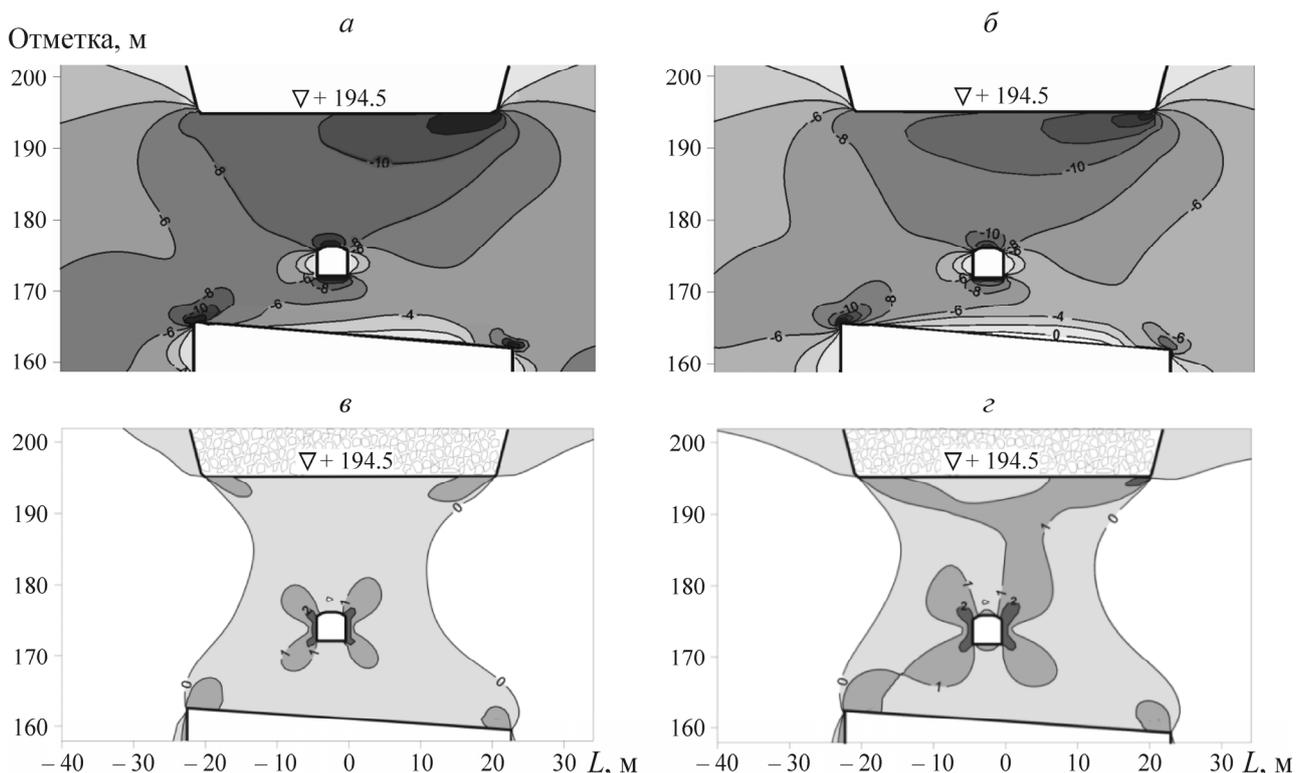


Рис. 5. Напряженное состояние потолочины под зумпфом: а, б — горизонтальные напряжения (МПа); в, г — зоны неупругих деформаций. Карьер заполнен обрушенной породой до отм. 233 м (а, в); обрушенная порода увлажнена и зеркало воды повышено до отм. + 240 м (б, г)

Пригрузка вследствие увлажнения обрушенных пород и дополнительного подъема зеркала воды на 10 м приводит к росту  $\sigma_x$  под дном карьера и в кровле ВЗШ (рис. 5б). Область  $\sigma_x$ ,

превышающих  $\sigma_{сж}$ , охватывает большую часть дна карьера. В кровле отработанного ЭБ № 1 появляются растягивающие  $\sigma_x$ , не превышающие, однако, прочность кимберлита на растяжение (рис. 5б).

В подкарьерном пространстве  $\sigma_s$  не достигает критических величин (2 МПа). Исключение — зона неупругих деформаций в окрестности ВЗШ, где  $\sigma_s$  превышает  $\sigma_s^к$  (рис. 5в). Дополнительная пригрузка потолочины приводит к некоторому увеличению зон неупругих деформаций и формированию их под дном карьера (рис. 5г).

Напряженное состояние потолочины в северо-восточной ее части характеризуется формированием сжимающих горизонтальных напряжений, сопоставимых и превышающих прочность пород на сжатие, под дном карьера, а также в кровле ВЗШ и отработанного пространства (рис. 6а).

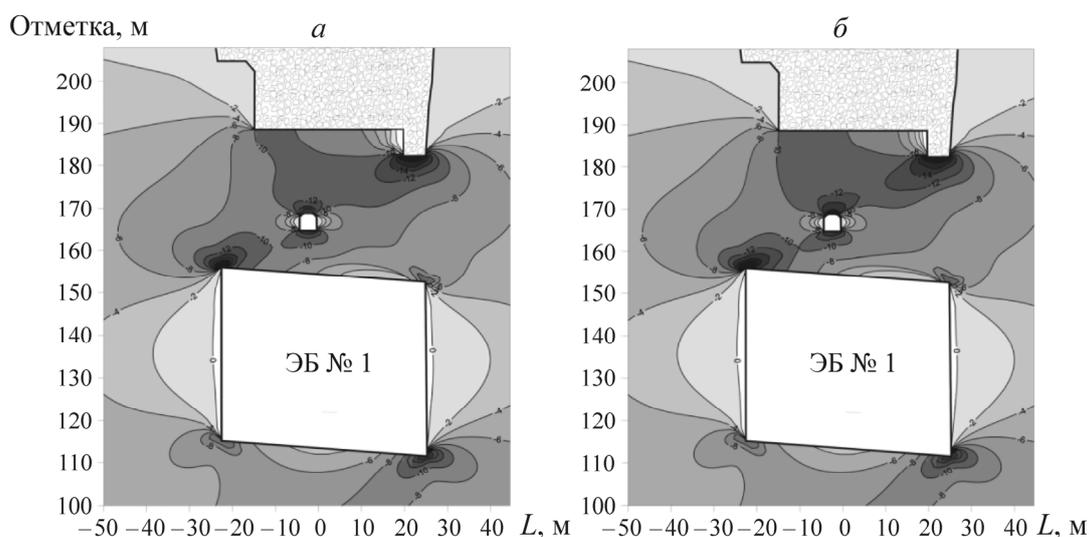


Рис. 6. Горизонтальные напряжения (МПа) под дном карьера в северо-восточной его части после полной отработки ЭБ № 1: а — карьер заполнен обрушенной породой; б — обрушенная порода увлажнена и зеркало воды повышено еще на 10 м

Асимметричный характер распределения напряженного состояния под дном карьера обусловлен, как и в потолочине под зумпфом, значительной разницей формы и высоты бортов карьера (см. рис. 2). Пригрузка приводит к увеличению сжимающих горизонтальных напряжений в потолочине, при этом отмечается сближение зон сжимающих  $\sigma_x$ , сопоставимых с  $\sigma_{сж}$ , между кровлей ВЗШ и дном карьера, а также почвой ВЗШ и кровлей выработанного пространства (рис. 6б).

Эволюция зон неупругих деформаций под дном карьера в северо-восточной его части на различных этапах пригрузки потолочины отражена на рис. 7. Обводнение обрушенной породы приводит к формированию под дном карьера областей  $\sigma_s$ , близких  $\sigma_s^к$  и охватывающих не только значительную часть подкарьерного пространства, но и выходящих в свод отработанного блока. Дальнейшее повышение зеркала воды приводит к смыканию зон критических деформаций, сформировавшихся в подкарьерном пространстве и в своде ВЗШ.

Таким образом, после отработки ЭБ № 1 напряжения в большей части рудной потолочины не достигают предельных значений ни по одному из принятых критериев разрушений (прочность на сжатие, на растяжение, критерий Кулона–Мора). Лишь в отдельных локальных зонах потолочины отмечены предельные концентрации напряжений — в верхней юго-восточной час-

ти потолочины, в почве и кровле ВЗШ. Учет увлажнения обрушенных пород и гипотетическое повышение зеркала воды еще на 10 м приводит к изменению геомеханической ситуации в потолочине: зоны предельных концентраций на сжатие увеличиваются ( $\sigma_x > \sigma_{сж}$ ), на сдвиг ( $\sigma_s > \sigma_s^к$ ) смыкаются в северо-восточной части карьера между дном карьера и кровлей ВЗШ.

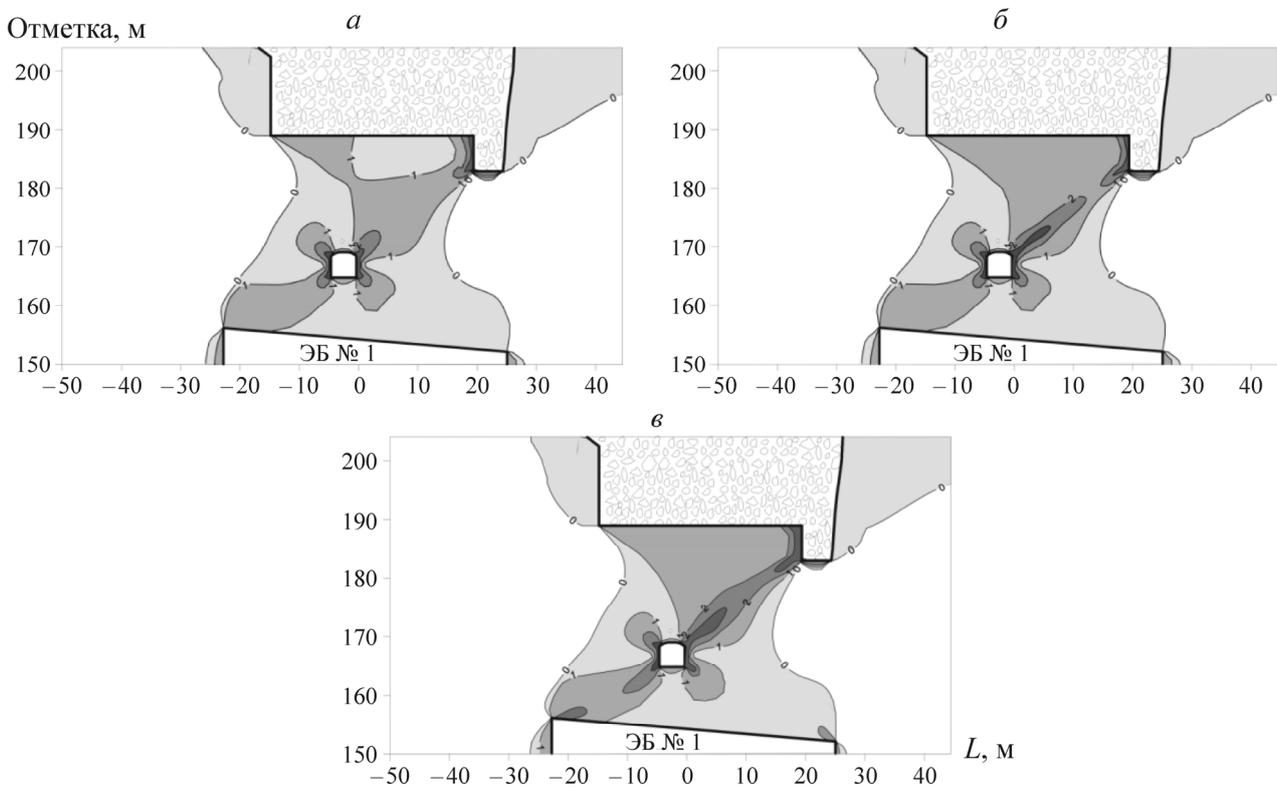


Рис. 7. Зоны неупругих деформаций под дном карьера в северо-восточной его части: *а* — карьер заполнен обрушенной породой; *б* — обрушенная порода увлажнена; *в* — зеркало воды повышено еще на 10 м

#### АНАЛИЗ И ПРОГНОЗ ОСАДОК ПОЧВЫ ОРТОВ

Мониторинг состояния потолочины предполагает наличие прогноза ее сдвижений в зависимости от меняющейся горнотехнической ситуации. Сдвижение рудной потолочины исследовалось на участках, оборудованных замерными станциями, в северо-восточной (орт № 2, левый) и юго-западной (орт № 1) частях СВРТ (см. рис. 1).

Приращение вертикальных смещений вдоль отметки почвы орта № 1, вызванное увлажнением заполненной до отм. + 233 м породы, составило  $\approx 1.84$  мм, т. е. около 0.22 мм на 1 м обрушенной породы. Дальнейшее повышение зеркала воды на 1 м приводит к вертикальным смещениям до 0.19 мм (рис. 8*а*). Максимальное вертикальное смещение вдоль отметки почвы орта № 2 составило около 3.68 мм, т. е. примерно 0.46 мм на 1 м увлажнения обрушенной породы. При повышении зеркала воды на 1 м — около 0.32 мм (рис. 8*б*). Разница в реакции массива в СВ и ЮЗ части СВРТ на увлажнение обрушенной породы и повышение зеркала воды объясняется тем, что толщина потолочины над ВЗШ, на уровне которого рассчитываются смещения, в СВ части составляет около 15 м, а в ЮЗ — около 28 м; толщина потолочины соответственно — около 30 и 40 м.

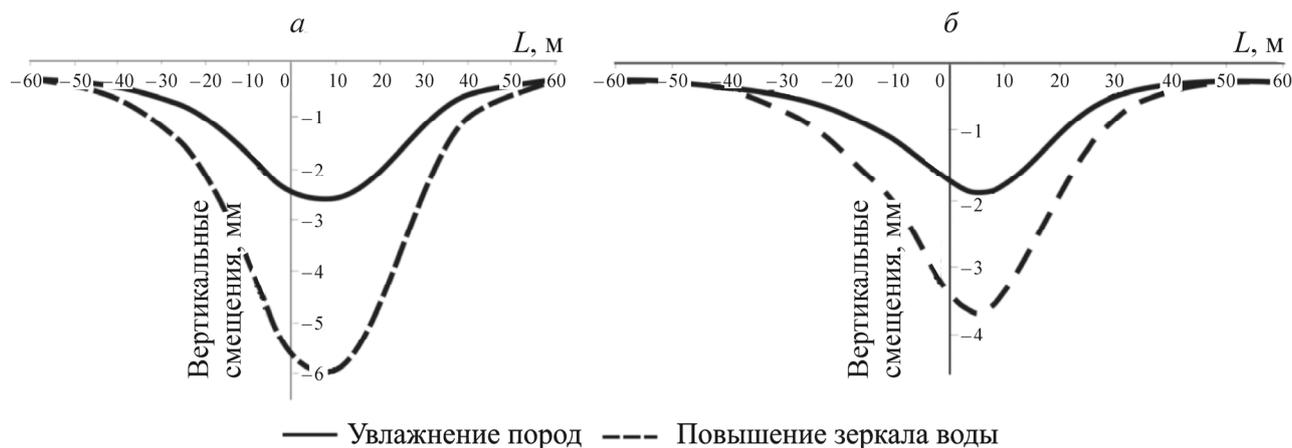


Рис. 8. Осадки почвы ортов при увлажнении породы, заполняющей карьер, и дополнительном повышении зеркала воды на 10 м: а — орт № 1 (сечение III, рис. 1), б — орт № 2 (сечение I, рис. 1)

## ВЫВОДЫ

1. Для управления геомеханической ситуацией в подкарьерном пространстве, связанной с изменением гидрологических условий отработки запасов, прогноз состояния массива целесообразно осуществлять с использованием методического подхода, основанного на совместном применении экспериментальных и численных методов анализа НДС породных массивов и определении потенциальных зон запредельного деформирования горных пород.

2. В целом состояние рудной потолочины рудника “Айхал” после отработки ЭБ № 1 по фактору НДС удовлетворительно: уровень напряжений для большей части потолочины не превышает предельных значений. Области запредельной концентрации напряжений локализованы под дном карьера и к кровле ВЗШ. Ухудшение гидрологической ситуации может привести к развитию зон неупругих деформаций и их смыканию между ВЗШ и дном карьера в северо-восточной его части, что может способствовать развитию магистральных водопроводящих трещин.

3. Прогноз сдвижений подкарьерной потолочины предлагается осуществлять по результатам расчетов с использованием адаптированной к условиям рудника математической модели.

4. Установлено, что для условий рудника “Айхал” увлажнение породы, заполняющей карьер, и дополнительное повышение зеркала воды в карьере приводит к пригрузке рудной потолочины и дополнительным смещениям, не превосходящим 0.5 мм на 1 м повышения зеркала воды.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Крайнев Б. А.** Экспериментальные исследования по определению безопасных условий подработки водозащитной толщи на калийных рудниках / Актуальные вопросы добычи и переработки природных солей. — СПб.: ОАО “ВНИИГалургии”, 2001.
2. **Дешковский В. Н., Невельсон И. С., Новокшенов В. Н.** Рациональный подход к определению параметров безопасной отработки свиты калийных и соляных пластов // Маркшейдерия и недропользование. — 2007. — № 1.
3. **Указания** по защите рудников от затопления и охраны подрабатываемых объектов в условиях Верхнекамского месторождения калийных солей. — СПб., 2008.

4. **Барях А. А., Самоделкина Н. А., Паньков И. Л.** Разрушение водоупорных толщ при ведении крупномасштабных горных работ. Ч. I // ФТПРПИ. — 2012. — № 5.
5. **Ржаницын А. Р.** Строительная механика. — М.: Высш. шк., 1991.
6. **Барях А. А., Самоделкина Н. А.** Разрушение водоупорных толщ при ведении крупномасштабных горных работ. Ч. II // ФТПРПИ. — 2012. — № 6.
7. **Барышников В. Д., Гахова Л. Н.** К вопросу геомеханического сопровождения отработки подкарьерных запасов рудника “Айхал” // Рудник Будущего. — Пермь: ГП “Западно-Уральский машиностроительный концерн”. — 2010. — № 3.
8. **Барышников В. Д., Гахова Л. Н.** Геомеханическое обоснование применения нисходящей слоевой системы отработки подкарьерных запасов рудника “Айхал” // Тр. конф. “Геодинамика и напряженное состояние недр Земли”. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2010.
9. **Барышников В. Д., Гахова Л. Н.** Геомеханическое обоснование параметров слоевой камерно-целиковой системы разработки с закладкой на руднике “Айхал” // ФТПРПИ. — 2008. — № 2.
10. **Булычев Н. С.** Механика подземных сооружений. — М.: Недра, 1989.
11. **Курленя М. В., Барышников В. Д., Гахова Л. Н.** Развитие экспериментально-аналитического метода оценки устойчивости горных выработок // ФТПРПИ. — 2012. — № 4.
12. **Гахова Л. Н.** Программа расчета напряженно-деформированного состояния массива блочной структуры методом граничных интегральных уравнений (ELB2D). РосАПО. свид. об офиц. регистр. № 960814.

*Поступила в редакцию 7/V 2013*