

УДК 539.3.01:622.834; 550.34+622.831

**ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА  
ПРИ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКЕ  
МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ**

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

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

Рассмотрены вопросы организации и проведения геомеханического мониторинга при подземной разработке месторождений. Дана краткая информация о разработанных программно-технических средствах инструментальной оценки напряженного состояния и свойств массива горных пород и результатах апробации комплексов в натуральных условиях. Предложена структура построения систем геомеханического мониторинга с использованием комплекса инструментальных, визуальных и численных методов определения механического состояния горных пород и его изменений в конструктивных элементах. На ее основе разработаны и реализованы системы контроля геомеханического состояния для ряда горных предприятий. Для оценки устойчивости конструктивных элементов систем разработки и принятия технических решений по обеспечению безопасности горных работ определены параметры предельного состояния массива горных пород.

*Мониторинг, напряженно-деформированное состояние, механические свойства горных пород, инструментальные наблюдения, численное моделирование*

**ВВЕДЕНИЕ**

Роль геомеханического обоснования технических решений по условиям подземной разработки полезных ископаемых существенно возрастает в связи с увеличением глубины ведения горных работ и, как следствие, ростом горного давления. Разрушение конструктивных элементов систем разработки, горные удары, увеличение затрат на управление горным давлением и поддержание выработок оказывают непосредственное влияние на эффективность горного производства. Особое значение приобретает контроль (мониторинг) состояния наиболее ответственных элементов инженерных сооружений. Нарушение их устойчивости приводит, как правило, к масштабным авариям и остановке горного производства на продолжительное время (вплоть до ликвидации предприятий), что влечет за собой, помимо значительных экономических потерь, социальные проблемы. Многообразие горно-геологических, геомеханических и горнотехнических условий разработки месторождений требует индивидуального подхода к формированию систем контроля (мониторинга).

Информационная основа при создании систем мониторинга обеспечивается с использованием инструментальных и теоретических методов, позволяющих решать следующие задачи:

— получение достоверной исходной информации о природном напряженном состоянии и механических свойствах массива горных пород;

---

Работа выполнена в рамках Программы РАН VII.60.1.3, Государственного задания по проекту VIII.74.1.2, при финансовой поддержке ОАО АК “АЛРОСА”, ФГУП “Горно-химический комбинат” Госкорпорации “Росатом”, филиала ОАО “РусГидро” – “Саяно-Шушенская ГЭС им. П. С. Непорожного”.

— установление закономерностей изменений напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов конструкции в процессе их деформирования, вызванного природно-техногенными факторами;

— экспериментально-аналитическое обоснование и оценка критериев предельных состояний горных пород и геоматериалов (бетона, закладки).

В качестве составных частей мониторинговых систем представлены последние разработки ИГД СО РАН в области создания технических средств определения напряженного состояния и механических свойств горных пород, контроля вертикальных сдвижений породного и закладочного массивов в процессе их подработки, а также методические подходы к оценке и прогнозу устойчивости конструктивных элементов систем разработки при реализации геомеханического мониторинга.

### РАЗВИТИЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДОВ

#### *Метод параллельных скважин*

В ИГД СО РАН разработаны ранее теоретические основы и оборудование для определения напряженного состояния и деформационных свойств массива горных пород методом параллельных скважин, не имеющим аналогов в мире [1]. Расчетная схема метода основана на решении задачи теории упругости о напряженно-деформированном состоянии плоскости с двумя круговыми отверстиями [2]. Математический аппарат и созданные технические средства (многоканальный деформометр с измерением смещений контура скважины более чем в трех направлениях и устройство для нагружения скважины) позволяют получать в каждом опыте ответ о соответствии расчетной модели реальному поведению массива и определять его параметры (упругие константы), а также оценивать погрешность полученных результатов в рамках принятой модели (т. е. методические погрешности измерения).

В настоящее время продолжены работы по развитию метода и технических средств измерений с переходом на современную элементную базу, а также по созданию на их основе методики проведения экспериментальных исследований [3, 4]. Проведена модернизация многоканального деформометра с использованием высоконадежных датчиков, что позволило повысить точность измерений смещений и сократить продолжительность опыта за счет температурной компенсации измерительных каналов.

Разработан экспериментальный образец автоматизированного измерительно-вычислительного комплекса (ИВК) для оценки НДС массива, обеспечивающего контроль измеряемых параметров в режиме реального времени для управления ходом эксперимента (рис. 1), обработку данных после завершения опыта непосредственно на месте его проведения с оценкой качества полученных результатов.

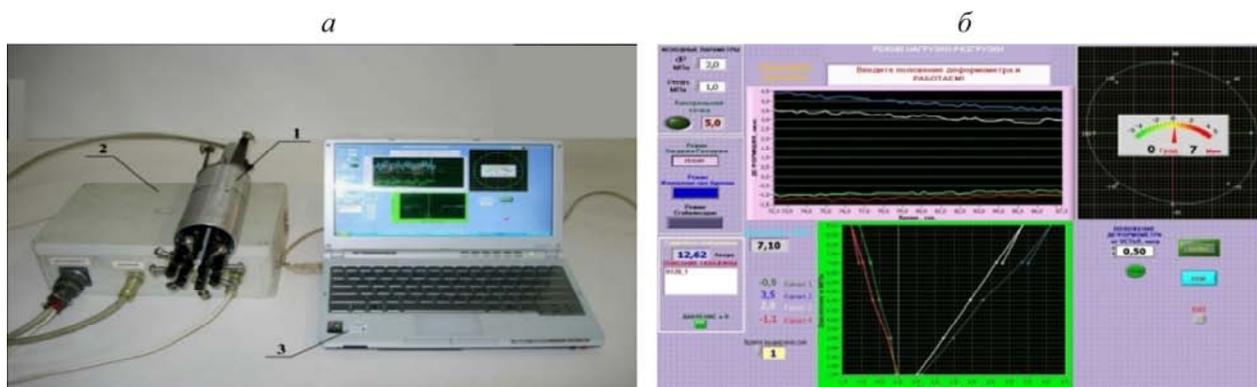


Рис. 1. Измерительно-вычислительный комплекс для определения НДС массива методом параллельных скважин (а) и экранная форма отображения контролируемых параметров (б)

### *Полевой комплекс для определения механических свойств горных пород*

Разработан программно-технический комплекс для оценки механических свойств горных пород при одноосном и объемном нагружении образцов (рис. 2). Комплекс позволяет оперативно определять деформационные и прочностные свойства горных пород (в том числе построение паспорта прочности) при испытании керна скважин непосредственно на объекте проведения исследований [5].



Рис. 2. Полевой приборный комплекс для определения деформационных и прочностных свойств горных пород при испытании керна

### *Скважинный инклинометрический комплекс*

Для контроля вертикальных сдвижений горных пород и закладочного массива разработан экспериментальный образец инклинометрического комплекса, включающего скважинный зонд, комплект досылочных штанг, устройство преобразования и передачи данных на ПК с общим и прикладным обеспечением для обработки информации [6].

В процессе измерений зонд продвигается по обсадной трубе от устья скважины по всей ее глубине через одинаковые интервалы (шаг передвижки). При этом программно снимаются и записываются в файл значения углов наклона скважины, а на их основе в графической форме идет построение профиля скважины в режиме реального времени (рис. 3). Программное обеспечение комплекса позволяет управлять экспериментом и сравнить полученные значения с результатами ранее выполненных измерений непосредственно на месте наблюдений. Последующая камеральная обработка экспериментальных данных позволяет оценить прогиб контролируемого массива относительно начального цикла измерений.

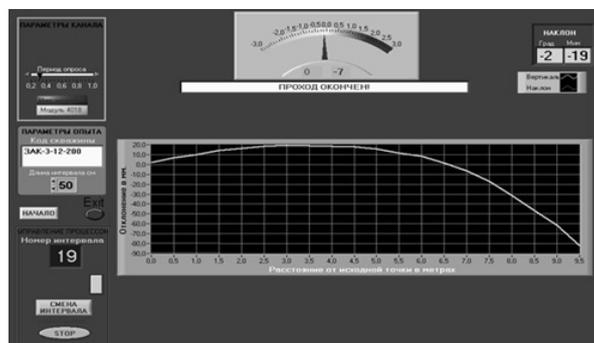


Рис. 3. Экранная форма программного обеспечения скважинного инклинометрического комплекса для оперативного контроля и управления ходом эксперимента

Разработанный комплект оборудования позволяет проводить наблюдения в субгоризонтальных скважинах ( $\pm 15^\circ$ ) глубиной до 100 м.

### Результаты испытаний измерительных средств

Для проверки работоспособности и надежности экспериментального образца программно-технических средств определения НДС массива методом параллельных скважин в 2012 г. проведены испытания комплекса в широком диапазоне изменений внешних условий и нагрузок в бетоне плотины Саяно-Шушенской ГЭС [7]. В процессе апробации оценивалась возможность применения метода и технических средств для условий бетонных плотин с целью внедрения в практику мониторинга гидротехнических сооружений альтернативных методов контроля НДС конструктивных элементов.

Результаты исследований показали:

— разработанный ИВК зарекомендовал себя надежным средством определения НДС бетонного массива, а его применение обеспечивает автоматизацию измерений и обработки данных на месте производства опыта;

— для выбранной геометрии эксперимента подтверждена правомерность использования в расчетах для бетонного массива, имеющего неориентированную зернистую структуру, аппарата теории упругости: линейная зависимость деформаций от давления (рис. 4а) и изотропный характер деформирования бетона при искусственном нагружении возмущающей скважины;

— определены упругие константы бетонного массива и величины действующих напряжений в секциях низовой грани плотины (рис. 4б) [7]. Из-за отсутствия натуральных данных о напряжениях в низовом клине плотины полученная информация имеет важное значение как для уточнения расчетных данных НДС плотины, так и для организации геомеханического мониторинга напряженного состояния в местах отсутствия закладной контрольно-измерительной аппаратуры.

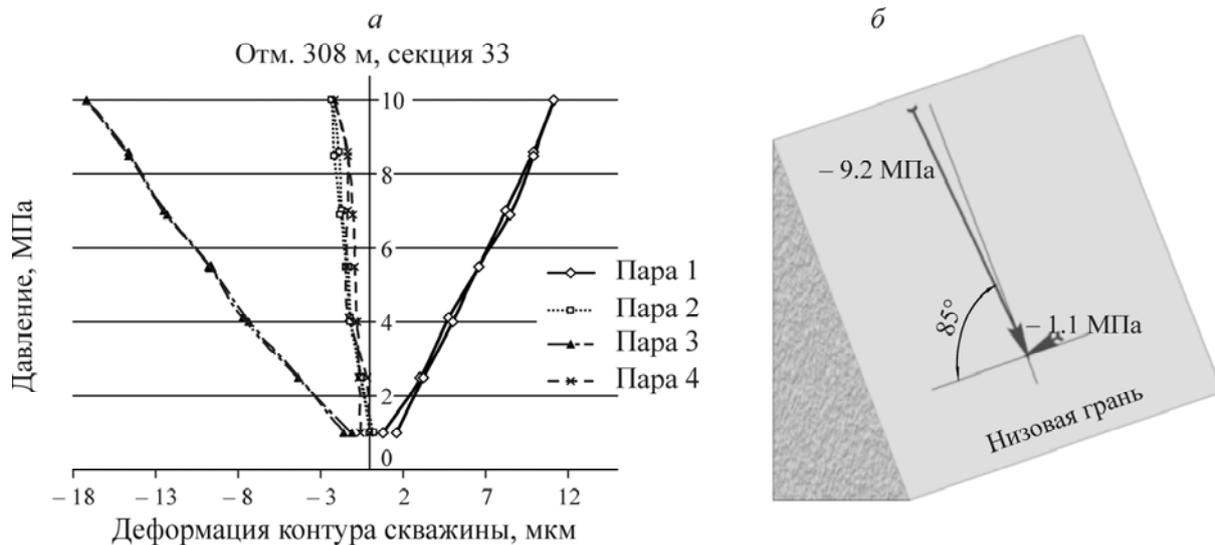


Рис. 4. Радиальные смещения контура скважины при определении упругой константы  $G_{\text{ж}}$  (а) и величины напряжений в бетоне секции 33 низовой грани плотины (б)

В 2013 г. проведена успешная апробация ИВК при исследовании методом параллельных скважин НДС железобетонной обделки подземных камер ФГУП "Горно-химический комбинат". Полученные результаты позволяют рекомендовать использование разработанных средств для экспериментальной оценки действующих напряжений в элементах конструкций [8], при решении задач определения остаточного ресурса потенциально опасных объектов в соответствии с методическими указаниями [9].

Выполнены испытания технических и программных средств определения деформационных и прочностных свойств образцов бетона с применением разработанного полевого комплекса (рис. 5). Результаты исследований (табл. 1, 2) свидетельствуют о возможности его использования для оперативной оценки показателей механических свойств бетона, что при наличии сведений о действующих напряжениях позволяет оценить запас прочности контролируемого элемента сооружения.

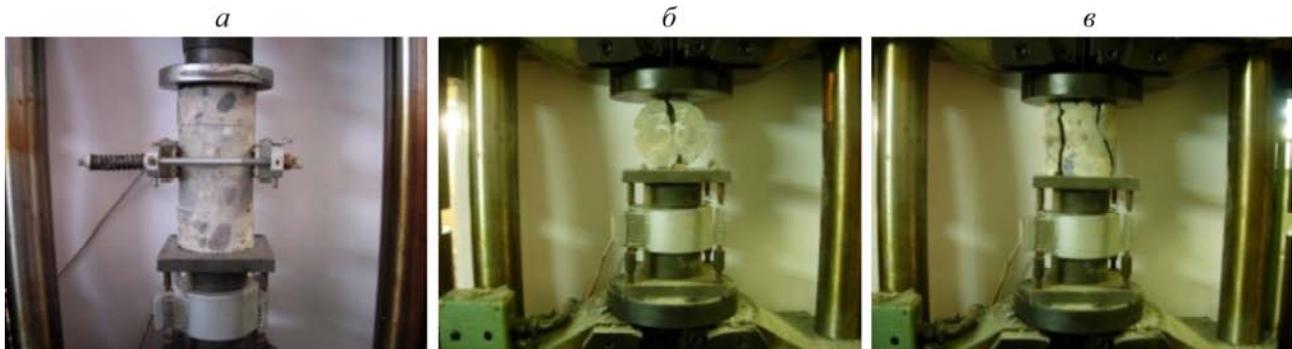


Рис. 5. Испытания бетонных кернов для определения деформационных свойств (а), пределов прочности на растяжение при раскалывании (б) и на одноосное сжатие (в)

ТАБЛИЦА 1. Показатели деформационных свойств образцов бетона

Номер образца	Глубина отбора керна, м	Модуль деформации $E_d$ , ГПа	Коэффициент поперечной деформации $\nu$	Модуль упругости $E_y$ , ГПа	Коэффициент Пуассона $\mu$
1	0.1	35.8	0.28	38.0	0.28
2	0.55	38.9	0.20	40.0	0.21
3	1.4	39.7	0.19	42.2	0.21
Среднее		38.1	0.22	40.1	0.23

ТАБЛИЦА 2. Результаты испытаний образцов бетона на растяжение при раскалывании и при одноосном сжатии

Номер образца	Глубина отбора керна, м	Диаметр образца $d$ , мм	Прочность на растяжение $\sigma_p$ , МПа	Прочность на сжатие $\sigma_{сж}$ , МПа
1	0.2	74	4.76	38.2
2	0.7	74	2.48	32.6
3	1.48	74	2.94	31.6
Среднее			3.39	34.1

Экспериментальная апробация инклинометрического комплекса выполнена в лабораторных [10] и натуральных условиях при проведении геомеханического мониторинга на руднике “Интернациональный” АК “АЛРОСА” [11]. Погрешность определения вертикальных отметок обсадной трубы составила 1 – 2 мм/м длины скважины (рис. 6).

По результатам исследований установлено следующее:

— созданный инклинометрический комплекс позволяет при проведении режимных наблюдений контролировать процесс сдвижений закладочного массива при его подработке с достаточной для практических целей точностью;

— дана количественная оценка вертикальных сдвижений закладки разрезного слоя (см. рис. б), необходимая для корректировки численных расчетов НДС подрабатываемого массива с целью выбора оптимальных параметров разработки и уточнения нормативной прочности закладки при отработке глубоких горизонтов;

— разработана методика проведения наблюдений за сдвижением подрабатываемого массива, используемая в дальнейшем в регламенте геомеханического мониторинга предохранительного целика под водоносным комплексом рудника [12].

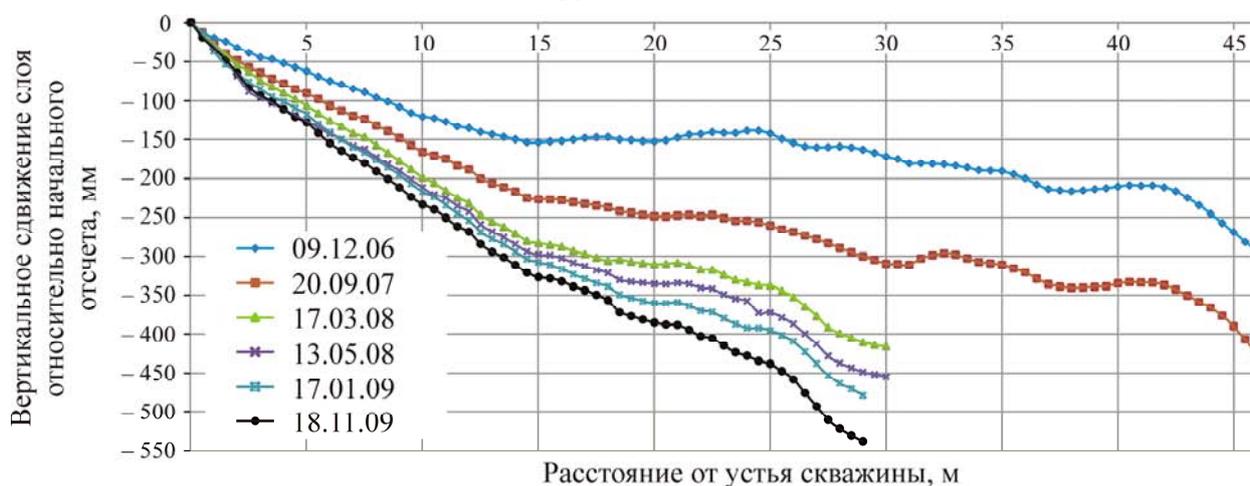


Рис. 6. Вертикальные смещения закладочного массива разрезного слоя при его подработке

### МОНИТОРИНГ НА РУДНИКЕ “АЙХАЛ” АК “АЛРОСА”

Геомеханический мониторинг представляет собой постоянно действующую систему, организованную в отдельные циклы (этапы) процедур, повторяющихся во времени: прогноз развития геомеханической ситуации — выбор контролируемых параметров и методов наблюдений — наблюдения — оценка фактического состояния по результатам наблюдений — принятие мер по управлению горным давлением (при необходимости) и совершенствование системы наблюдений. Поскольку все этапы получения информации тесно связаны между собой, недостаточное внимание к качеству выполнения какого-либо из них неизбежно приведет к снижению достоверности результатов мониторинга и, как следствие, качеству принятых на их основе технических решений.

Приведем некоторые результаты практической реализации комплексного подхода к проведению геомеханического мониторинга на руднике “Айхал”.

После завершения открытой отработки кимберлитовой трубки “Айхал” до глубины 325 м (до абс. отм. +205 м) от поверхности на руднике приступили к подземной разработке контурных запасов в северо-восточном борту карьера в отм. +330 ÷ +205 м и подкарьерных запасов. По условиям безопасности горные работы в переходной зоне характеризуются по условиям безопасности наибольшей сложностью вследствие предельного состояния бортов карьера.

Из-за невозможности использования традиционных маркшейдерских методов наблюдений за устойчивостью формируемых откосов при разработке контурных запасов (отсутствие доступных берм и прямой видимости для организации наблюдений) системой подэтажной выемки с открытым очистным пространством в ИГД СО РАН разработали систему контроля состояния приборогового массива подземных горных выработок. Она основана на использовании станций глубинных реперов, оборудованных в скважинах с установкой реперов на различных расстояниях от контура откоса до начала его формирования, в комплексе с визуальными наблюдениями по кон-

трольным скважинам за нарушенностью прибортового массива [13]. Предложенная система позволяет количественную оценку параметров сдвижений горных пород по реперным станциям дополнить видимыми признаками деформирования контролируемого участка: выделить зоны образования техногенных трещин, их характер (сдвиг или раскрытие) и ориентацию.

На рис. 7 приведена схема расположения реперной станции и параметры деформирования прибортового массива на участке первого обрушения откоса. Получены необходимые для прогноза обрушений пород количественные показатели их деформирования [14]:

— установлен тип разрушения откоса — отрыв прибортового массива с последующим опрокидыванием блока в карьерное пространство;

— предвестником наступления активной стадии деформирования является скачкообразное приращение смещений репера (как правило, после взрывных работ) с последующим незатухающим нарастанием со скоростью 10–12 мм/сут; градиент смещений репера на глубине скважины  $h = 30$  м (на удалении 2 м от контура откоса) до начала активной стадии составил 110 мм, а смещения от начала наблюдений достигли 120 мм;

— продолжительность активной стадии (деформирование с установившейся скоростью) — 10 сут; общая величина смещений репера в момент обрушения откоса — 238 мм;

— раскрытие одной или нескольких трещин в прибортовом массиве не приводит к автоматической потере его устойчивости; так, в интервале 3–10 м от контура откоса (реперы на глубинах 17.5–2.5 м) при общем раскрытии трещин около 40 мм откос сохранял устойчивость в течение 400 дней.

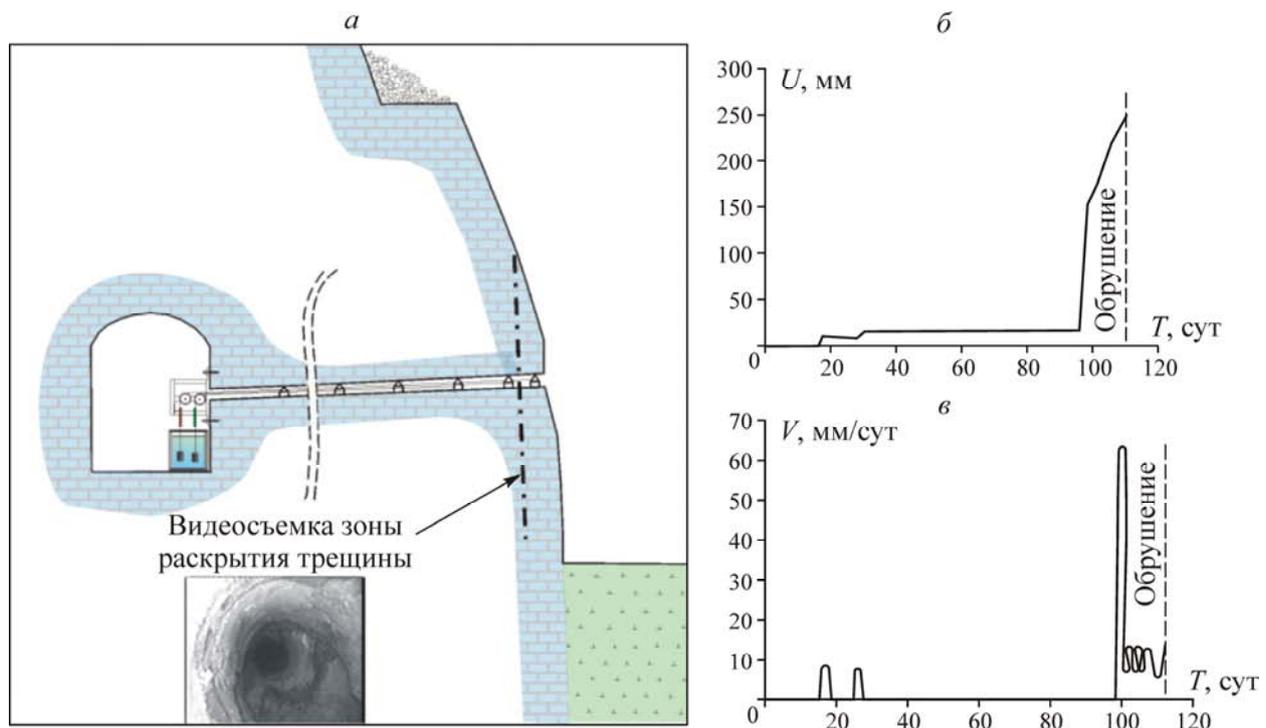


Рис. 7. Схема расположения реперов на станции (а); графики смещений  $U$  (б) и скоростей  $V$  (в) до момента обрушения откоса (реперы на глубине 30 м)

Полученная информация послужила основой для разработки инструкции по режиму проведения наблюдений и порядку принятия оперативных решений по обеспечению безопасности горных работ в зонах прогнозируемых обрушений, что позволило отработать около 600 тыс. т законтурных запасов и охранный целик вблизи портала без укрепления откосов.

Подземная разработка подкарьерных запасов на руднике “Айхал” осложнена рядом обстоятельств, главными из которых являются:

- наличие на дне карьера обводненных илов, что наравне с атмосферными осадками в весенне-летний период создает угрозу прорыва воды и пульпы в горные выработки;
- сложные геомеханические условия ведения горных работ в подкарьерной толще пород, вызванные чрезвычайной изменчивостью морфологии трубки (как в плане, так и по высоте), высокой неоднородностью механических свойств кимберлита и труднопрогнозируемым их изменением вследствие повышенной увлажненности массива, техногенного воздействия взрывных работ в карьере и изрезанностью рудной толщи ранее пройденными горно-подготовительными выработками на отм. +192 ÷ +180 м (рис. 8);
- недостаточная изученность механического состояния рудного массива ниже дна карьера и отсутствие данных по предельно допустимым параметрам деформирования кимберлита, что вполне объяснимо, так как рудник “Айхал” — первое горное предприятие АК “АЛРОСА”, приступившее к подземной отработке подкарьерных запасов.

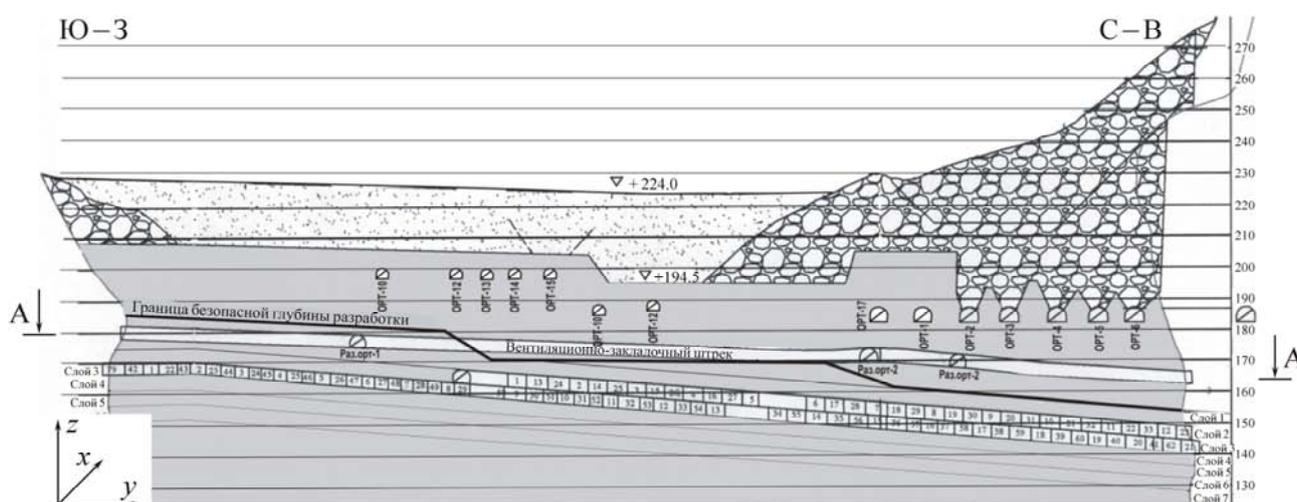


Рис. 8. Вертикальный разрез по простиранию Северо-Восточного рудного тела

В соответствии с проектом отработка подкарьерных запасов осуществляется с применением слоевой камерно-целиковой системы разработки с твердеющей закладкой. Для защиты горных выработок от прорыва обводненных илов со дна карьера предусмотрено оставление подкарьерной рудной потолочины мощностью 25 м.

Для снижения риска затопления горных выработок в сложных гидрогеомеханических и горнотехнических условиях рудника создание потолочины производится путем выемки разрезного слоя 3. После его отработки толщина потолочины составит 35 м. При благоприятной гидрогеомеханической ситуации планировалось последовательно в восходящем порядке отработать слои 2 и 1. При этом контур кровли слоя 1 достигает границы безопасной глубины разработки, расположенной на удалении 25 м от дна карьера (рис. 8).

Ведение очистных работ в таких сложных условиях должно сопровождаться обязательным контролем состояния формируемой рудной потолочины, осуществляемым в рамках комплексного проекта гидрогеомеханического мониторинга. Основной целью геомеханического мониторинга является получение исходной информации о механическом состоянии рудного массива

ва и его изменении в процессе ведения очистных работ для своевременного принятия мер по обеспечению безопасных условий отработки. Выбор методов натуральных наблюдений основан на прогнозе ожидаемых изменений НДС с учетом имеющихся в наличии надежных измерительных средств.

Из-за отсутствия информации о механических свойствах кимберлита на начальном этапе были определены прочностные и деформационные свойства подкарьерного рудного массива. Испытания проводились непосредственно на объекте по керну скважин, пробуренных по простиранию рудной потолочины с применением разработанного в ИГД СО РАН полевого комплекса. Установлены параметры механических свойств массива с учетом структурного ослабления:  $\sigma_{сж} \approx 12$  МПа,  $\sigma_p \approx 1$  МПа;  $E = 10$  ГПа,  $\nu = 0.25$  [15]. Коэффициент бокового отпора принят в соответствии с проектными расчетами потолочины  $\lambda = 0.5$  (необходимо экспериментальное уточнение в ходе мониторинга).

Прогнозная оценка НДС рудной потолочины до начала ее формирования по проектному варианту отработки слоев 3→1 показала следующее [15]:

— напряженное состояние потолочины характеризуется разгрузкой от вертикальных напряжений, а горизонтальные напряжения являются определяющими при оценке ее устойчивости;

— зона запределного деформирования рудного массива по критерию прочности на сжатие отмечается в ЮВ части на глубину до 2–3 м от дна карьера и в кровле вентиляционно-закладочного штрека (ВЗШ);

— после отработки разрезного слоя основная часть потолочины испытывает дополнительное обжатие, что не создает условий для раскрытия в ней вертикальных трещин и, как следствие, не способствует возрастанию водопритоков со дна карьера;

— в кровле разрезного слоя формируется зона дополнительных растягивающих горизонтальных деформаций, что в случае образования трещин снижает эффективную мощность потолочины;

— максимальные вертикальные осадки почвы ортов пройдут после отработки подсечного слоя (до 37 мм). В процессе выемки 2-го и 1-го слоев приращения осадок ожидается 5–6 и 10–12 мм соответственно. Суммарное значение вертикальных осадков почвы ортов достигает 40–43 мм.

Проведенный анализ позволил выбрать контролируемые параметры, методы наблюдений и зоны контроля деформационных процессов из горных выработок в рудной потолочине [15]:

- наблюдения за деформациями и разрушениями приконтурной части ВЗШ для контроля размеров предохранительного целика над ним осуществляются с использованием контурных реперов и скважинных визуальных наблюдений;

- контроль за возможными расслоениями кровли очистного пространства, снижающими эффективную мощность потолочины, производится по станциям глубинных реперов в комплексе со скважинными эндоскопическими наблюдениями;

- контроль изменений механических свойств подкарьерного массива методом сейсмического профилирования осуществляется по всей длине ВЗШ; наблюдения за вертикальными сдвигами потолочины выполняются по реперам профильных линий в ортах № 1 и № 2; полученная информация необходима для корректировки параметров расчетной модели.

В качестве иллюстрации результатов мониторинга приведем данные наблюдений по реперам профильной линии в орте № 1 в процессе отработки подкарьерных запасов (рис. 9). Следует отметить, что теоретическая кривая осадок почвы орта, полученная на основе данных по испытаниям керна ( $E = 10$  ГПа), уточнена после отработки слоя 3 по результатам продольного

сейсмического профилирования ВЗШ ( $E = 7.1$  ГПа). Сравнение результатов скорректированных расчетов сопоставимы с натурными данными, полученным при нивелировании реперов профильной линии после отработки слоя 3 (см. рис. 9), что позволяет считать модель адекватной данным граничным условиям.

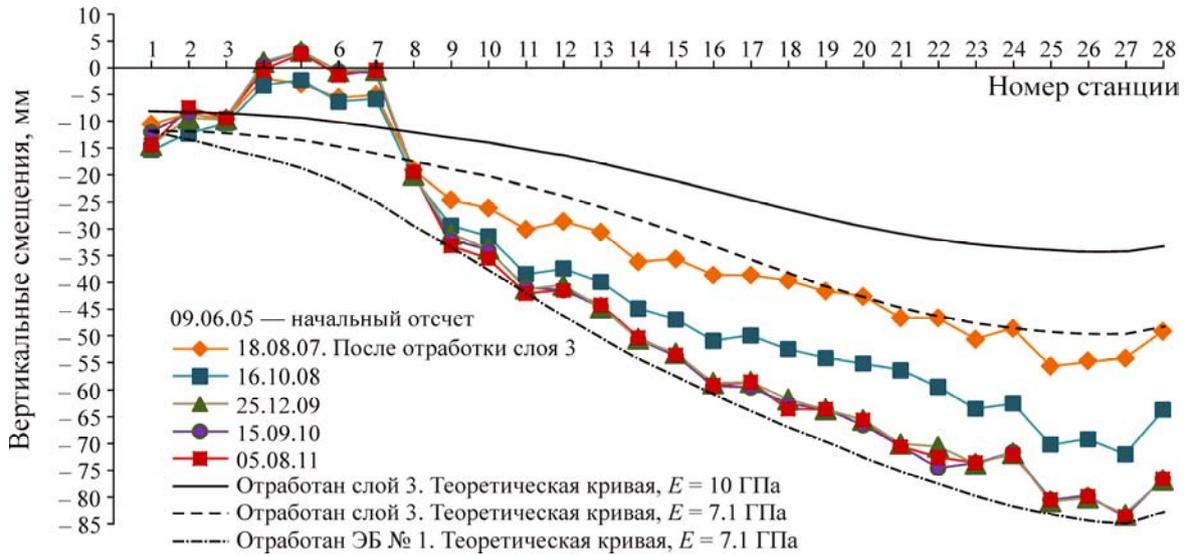


Рис. 9. Вертикальные смещения реперов профильной линии в орте № 1

Для анализа результатов мониторинга необходимо обоснование и выбор критериев разрушения массива. С этой целью предложен экспериментально-аналитический метод определения предельных значений при сравнительной оценке визуально установленных зон разрушения пород с данными численных расчетов [16]. Численные расчеты НДС показали, что при различной высоте бортов карьера (около 100 м) деформирование потолочины носит сдвиговый характер. Это позволяет использовать критерий прочности Кулона–Мора по сдвигающим напряжениям ( $\sigma_s$ ) [17].

Визуальные наблюдения за состоянием стенок контрольного шпура, пробуренного в кровле ВЗШ (рис. 10а), показали, что зона расслоений в приконтурной части достигает максимальной глубины 1.7 м и находится в области  $\sigma_s \geq 2$  МПа (рис. 10б). Результаты визуальных наблюдений и численного анализа позволили принять и использовать для оценки состояния подкарьерного массива рудника “Айхал” в качестве критического значение  $\sigma_s^k \approx 2$  МПа [18].

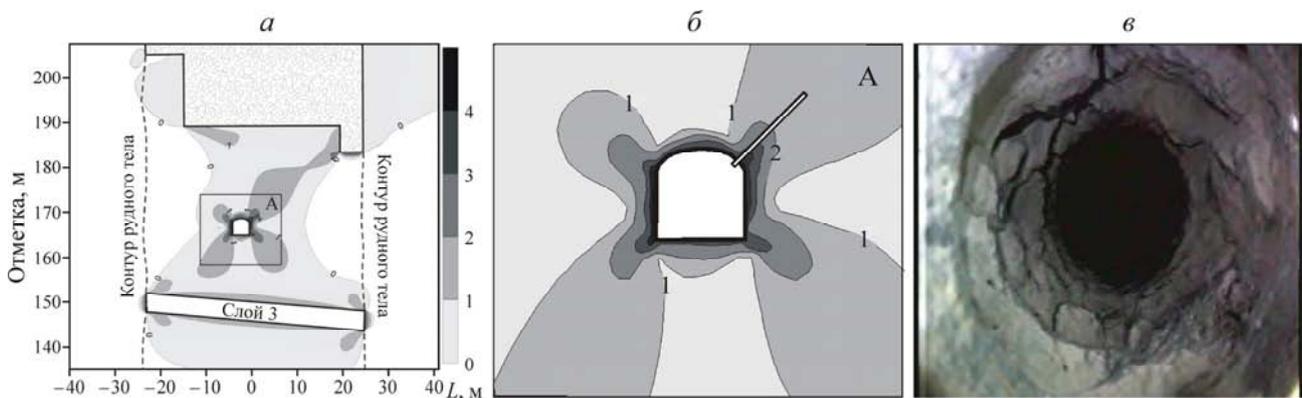


Рис. 10. Изолинии  $\sigma_s$  в подкарьерном массиве (а) и в окрестности закладочного штрека с указанием положения контрольного шнура (б); нарушение контура шнура на глубине 1.7 м (в)

На рис. 11 отражена эволюция зон неупругих деформаций под дном карьера в северо-восточной его части на различных этапах выемки подкарьерных запасов. После отработки в восходящем порядке слоев 3→2→1 не образуется сплошной локализованной зоны запредельного деформирования в потолочине (рис. 11а). При схеме отработки (а) выемка слоя 4 приводит к смыканию зон критических деформаций, формирующихся между сводом ВЗШ и дном карьера (см. рис. 11б). При отработанных слоях 3→2 выемка нижележащих слоев не приводит к смыканию зон неупругих деформаций (см. рис. 11в), что сохраняет водозащитные свойства потолочины. С учетом прогнозных оценок на руднике отказались от отработки слоя 1 и перешли на нисходящий порядок отработки запасов ниже слоя 3.

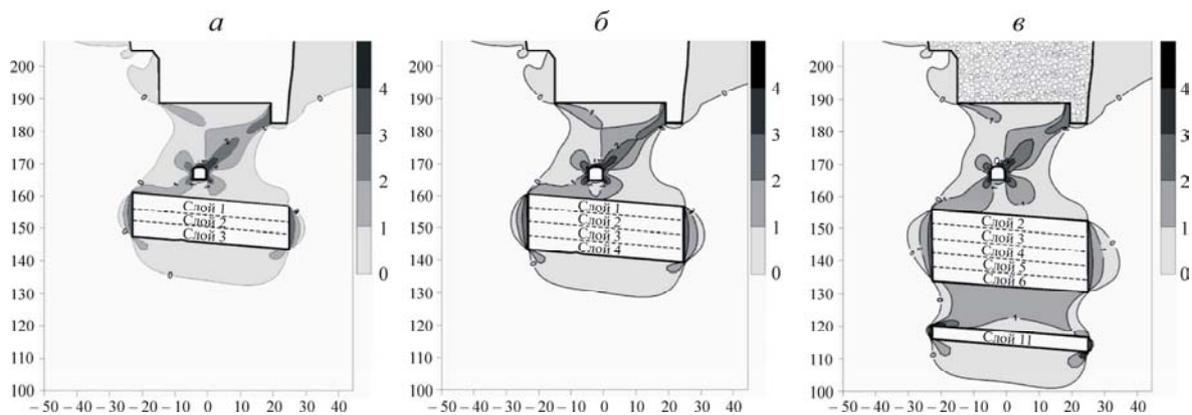


Рис. 11. Зоны неупругих деформаций ( $\sigma_s \geq 2$  МПа) в подкарьерной потолочине после выемки слоев 3→2→1 (а), 3→2→1→4 (б) и слоев 2–6, 11 (в)

Отметим также, что общие методические принципы и разработанные технические средства применены на практике при геомеханическом обосновании условий отработки запасов таликовой зоны рудника “Бадран” [19] (Республика Саха (Якутия)) и организации мониторинга предохранительного целика под метегеро-ичерским водоносным комплексом на руднике “Интернациональный” АК “АЛРОСА” [20].

## ВЫВОДЫ

Разработаны экспериментальные образцы автоматизированных комплексов для определения напряженного состояния и механических свойств горных пород, а также для контроля вертикальных сдвижений закладочного массива при его подработке. Проведены успешные испытания комплексов в промышленных условиях.

Предложена и реализована на практике система контроля устойчивости бортов карьера при подземной отработке законтурных запасов на завершающей стадии открытых горных работ. Комплексное применение скважинных инструментальных и визуальных методов наблюдений из подземных выработок позволило определить предельные параметры деформирования прибортового массива для конкретных условий месторождения, с использованием которых выполнялась оценка его состояния для принятия своевременных мер по обеспечению безопасности горных работ.

Практический опыт создания систем геомеханического мониторинга и отдельных его элементов для обоснования параметров разработки и контроля состояния предохранительного це-

лика в переходной зоне под водоносным объектом свидетельствует о необходимости комплексного подхода к его организации с учетом конкретных горнотехнических и гидрогеомеханических условий.

Важным элементом мониторинга является математическое моделирование НДС конструктивных элементов разработки и инженерных сооружений, позволяющее учитывать влияющие факторы и осуществлять оценку и прогноз развития геомеханических процессов при освоении месторождений. Точность полученных оценок НДС при моделировании определяется достоверностью исходной информации о механических свойствах и природном напряженном состоянии массива горных пород. Для повышения надежности прогноза в процессе мониторинга необходима адаптация расчетной модели реальному поведению массива по данным инструментальных наблюдений и использование экспериментально установленных в натуральных условиях критериев разрушения и их предельных значений. Возможность, целесообразность и последовательность реализации тех или иных элементов мониторинга обусловлены конкретными горно-геологическими и горнотехническими условиями месторождения, а также состоянием контролируемых элементов сооружения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. № 877005 СССР. Способ определения НДС в массиве горных пород / М. В. Курленя, В. Д. Барышников, Г. Ф. Бобров, С. Н. Попов, В. К. Федоренко // Опул. в БИ. — 1981. — № 40.
2. Курленя М. В., Попов С. Н. Теоретические основы определений напряжений в горных породах. — М.: Наука, 1993.
3. Барышников В. Д., Качальский В. Г. Автоматизированный измерительный комплекс приборов для определения напряжений в массиве горных пород методом параллельных скважин // ФТПРПИ. — 2010. — № 3.
4. Барышников В. Д., Качальский В. Г. Программное обеспечение для определения напряжений в массиве горных пород // Proceedings of the V-th International Geomechanics Conference 18–21 June 2012, Publ.: International House of Scientists “Fr. J. Curie”, Varna, Bulgaria.
5. Барышников В. Д., Качальский В. Г. Универсальный измерительный комплекс для определения НДС и механических свойств горных пород // Труды конф. “Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды”, 28 июня–2 июля 2010 г. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2010.
6. Барышников В. Д., Качальский В. Г., Барышников Д. В. К вопросу контроля сдвижений залочного массива методом инклинометрии // 2-я Рос.-Кит. науч. конф. “Нелинейные геомеханико-геодинамические процессы при отработке месторождений полезных ископаемых на больших глубинах”: сб. тр. 4. — Новосибирск, 2012.
7. Барышников В. Д., Качальский В. Г., Барышников Д. В. Экспериментальная оценка действующих напряжений в бетонной плотине // Гео-Сибирь–2013. — Новосибирск: СГГА, 2013. — Т. 3.
8. Baryshnikov V. D., Baryshnikov D. V., Khmelinin A. P. Experimental estimation of the mechanical condition of reinforced concrete lining in underground excavations // Proceedings of the XIV-th International Multidisciplinary Scientific GeoConference, 17–26 June 2014, SGEM, Albena, Bulgaria, 2014.
9. РД 09-102-95: “Методические указания по определению остаточного ресурса потенциально опасных объектов, поднадзорных Госгортехнадзору России”. Постановление Госгортехнадзора России № 57 от 17.11.1995.

10. **Барышников Д. В., Сабуров С. В.** Инклинометрический комплекс и его применение для контроля сдвижений подрабатываемых массивов // Proceedings of the V-th International Geomechanics Conference 18–21 June 2012, Publ.: International House of Scientists “Fr. J. Curie”, Varna, Bulgaria.
11. **Барышников В. Д., Барышников Д. В.** Инструментальный контроль сдвижений закладки при ее подработке // ГИАБ. — 2013. — Отд. вып. “Дальний Восток”.
12. **Барышников В. Д., Барышников Д. В.** Геомеханический контроль предохранительного целика под водоносным комплексом // Proceedings of the V-th International Geomechanics Conference, 18–21 June 2012, Publ.: International House of Scientists “Fr. J. Curie”, Varna, Bulgaria.
13. **Барышников В. Д.** Контроль устойчивости прибортового массива в зоне перехода от открытой разработки месторождения к подземной // Горн. журн. — 2006. — № 10.
14. **Опарин В. Н., Барышников В. Д., Востриков В. И., Гахова Л. Н., Крамсков Н. П.** О проблемах безопасности освоения кимберлитовых месторождений в сложных горно-геологических и природно-климатических условиях // Горн. журн. — 2011. — № 1.
15. **Барышников В. Д., Гахова Л. Н., Черепнов А. Н.** Геомеханическая оценка и контроль состояния рудной потолочины при переходе от открытой к подземной разработке // Труды 21-го Всемирного конгресса. — Краков, Польша, 2008. — Т. 3.
16. **Курленя М. В., Барышников В. Д., Гахова Л. Н.** Развитие экспериментально-аналитического метода оценки устойчивости горных выработок // ФТПРПИ. — 2012. — № 4.
17. **Курленя М. В., Барышников В. Д., Гахова Л. Н.** Влияние частичного затопления карьера “Ай-хал” на напряженно-деформированное состояние рудной потолочины // ФТПРПИ. — 2013. — № 4.
18. **Барышников В. Д., Гахова Л. Н.** Параметры рудной потолочины при переходе от открытой к подземной отработке месторождений // Proceedings of the VI-th International Geomechanics Conference, 24–28 June 2014, Publ.: International House of Scientists “Fr. J. Curie”, Varna, Bulgaria.
19. **Барышников В. Д., Гахова Л. Н.** Геомеханическая оценка состояния выработок при разработке золоторудного месторождения “Бадран” системами с закладкой // Труды междунар. конф. “Роль геомеханики в устойчивом развитии горной промышленности и гражданского строительства”. — Несебыр, Болгария, 2007.
20. **Барышников В. Д., Барышников Д. В.** Геомеханический контроль предохранительного целика под водоносным горизонтом // Proceedings of the V-th International Geomechanics Conference, 18–21 June 2012, Publ.: International House of Scientists “Fr. J. Curie”, Varna, Bulgaria.

*Поступила в редакцию 11/VIII 2014*