

НОВЫЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ В ГОРНОМ ДЕЛЕ

УДК 539.3.01 : 622.834; 550.34 + 622.831

РАЗРАБОТКА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СКВАЖИННЫХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ И КОНТРОЛЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ ГОРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

**М. В. Курленя, В. Д. Барышников, Д. В. Барышников,
Л. Н. Гахова, В. Г. Качальский, А. П. Хмелинин**

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

Представлены программно-технические средства инструментальной оценки и контроля геомеханического состояния инженерно-технических сооружений. Дано описание предлагаемой техники измерения радиальных и продольных смещений контура контрольных скважин. Предложены методология проведения исследований и интерпретация экспериментальных данных с анализом и контролем напряженно-деформированного состояния горных сооружений. Приведены результаты апробации разработанных программно-технических средств в условиях промышленных предприятий.

Смещение, деформация, напряженно-деформированное состояние, скважинный деформометр, инклинометр, инструментальные наблюдения, массив горных пород, железобетонная обделка

DOI: 10.15372/FTPRPI20190420

В практике инженерного проектирования подземных сооружений используются рейтинговые классификационные системы, основанные на оценке механических свойств горного массива в зависимости от его геолого-структурных особенностей [1 – 6]. Аналитические и численные методы получили широкое распространение в горном деле при разработке месторождений и управлении горным давлением [7 – 11].

В решении геомеханических задач устойчивости конструктивных элементов систем и инженерно-технических сооружений один из наиболее важных вопросов — определение нагрузок, вызванных исходным напряженным состоянием массива и техногенным воздействием. Надежность полученных оценок связана с достоверностью информации о параметрах нетронутого массива и их изменений в процессе разработки месторождений и эксплуатации сооружений. Развитие и совершенствование экспериментальных методов в части повышения точности измерений контролируемых параметров, методологии проведения исследований, обработки и представле-

ния полученных результатов с оценкой их качества является актуальной задачей. Применение натуральных способов определения напряжений — обязательное условие создания систем геомеханического мониторинга [12–14].

РАЗВИТИЕ ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД

Анализ мировой тенденции развития измерительных средств определения напряжений и деформаций массива горных пород с помощью скважинных геомеханических методов показывает, что происходит постоянное совершенствование не столько самих методов, сколько приборной базы с учетом современных достижений в области микро- и нанoeлектроники, автоматизации измерений, обработки и интерпретации данных. Разработке способов и технических средств за многолетнюю историю их создания посвящено большое число работ [14–21].

Для исследований напряженно-деформированного состояния массива горных пород и промышленных сооружений в Институте горного дела СО РАН разработан метод параллельных скважин, получивший дальнейшее развитие в программно-технических средствах его реализации [14, 18, 21]. Для повышения точности определения напряжений в массиве проведена модернизация скважинного многоканального деформометра с использованием в его полномостовой схеме современных высокоточных датчиков деформаций [22]. Размещение ориентирующего устройства и измерительной схемы внутри корпуса деформометра уменьшает термозависимость последней и обеспечивает передачу сигналов в цифровом виде (рис. 1). Данные по каналу связи поступают в компактный блок преобразования из стандарта RS-485 в радиоканал для передачи в планшетный компьютер. Программное обеспечение планшетного компьютера, фиксирующее данные и запись в файлы результатов, позволяет отображать процесс деформирования измерительной скважины при бурении и нагружении возмущающей скважины в реальном времени. В результате проведенной модернизации деформометра получены устойчивые показатели измерения радиальных смещений контура скважины.

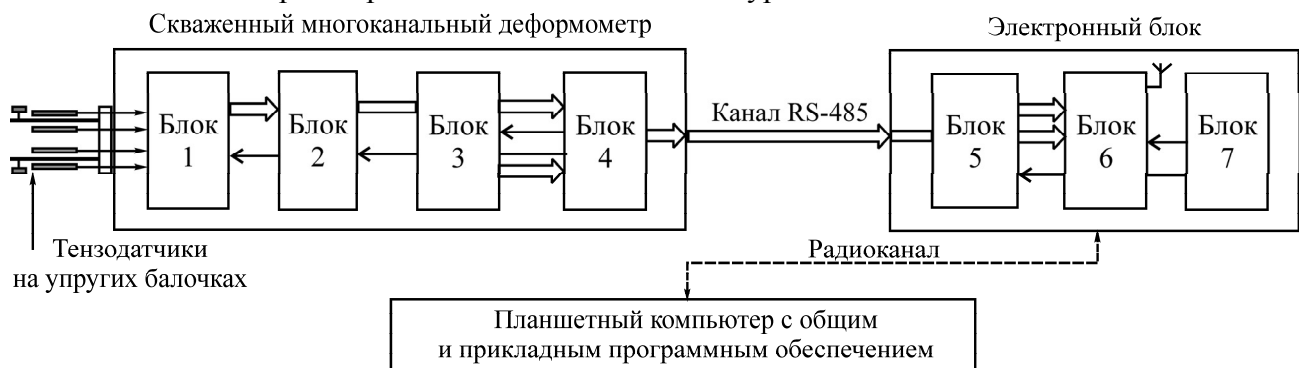


Рис. 1. Блок-схема модернизированного многоканального деформометра: блок 1 — усилители; блок 2 — аналого-цифровой преобразователь и процессор; блок 3 — инклинометр; блок 4 — линейные преобразователи; блок 5 — аналого-цифровой преобразователь; блок 6 — канал RS-485; блок 7 — аккумулятор

Принятые технические решения и метод программной компенсации температурного дрейфа показаний измерительной системы позволяют повысить точность определения деформационных свойств и действующих напряжений в массиве при проведении экспериментов методом параллельных скважин. Реализация способа предусматривает выбор опытного участка и контроль его качества по анализу в режиме реального времени радиальных смещений контура измерительной скважины во время бурения и последующего нагружения возмущающей скважины [23]. Полученная информация дает возможность уточнить соответствие расчетной модели

реальному поведению участка массива, определить его модуль упругости, компоненты напряжений с оценкой их погрешностей в рамках выбранной модели и квазиглавных напряжений в плоскости, ортогональной оси скважины [18].

Для проверки и прогноза устойчивости элементов конструкций в горных работах предложен способ контроля напряженно-деформированного состояния, основанный на измерении смещений реперов вдоль продольной оси контролируемой скважины [24]. Места закрепления реперов выбирают в непосредственной близости к границам естественных блоков, определяемых по анализу керна контрольной скважины или результатам видеосъемки состояния контура. При отсутствии нарушений массива реперы устанавливают через определенный интервал по глубине скважины, располагая дальний от ее устья репер вблизи границы предполагаемого обнажения. Измерения смещений реперов осуществляют относительно жестко закрепленного на устье скважины кондуктора. Для этого каждый из реперов оснащен автономной гибкой связью, свободный конец которой выводится на измерительный блок кондуктора и соединяется с натяжным устройством.

По измеренным смещениям вычисляют поинтервальные деформации массива вдоль продольной оси скважины. Выделение зон неупругих деформаций осуществляют путем сравнения значений упругих деформаций с предельно допустимым для данного типа пород, определенным по результатам испытаний кернов. Наступление активной стадии деформирования горной породы в зоне неупругих деформаций и ее продолжительность, вплоть до обрушения прибортового массива в отработанное пространство, устанавливают по тем реперам, на которых регистрируются смещения относительно кондуктора с незатухающей скоростью. Значения предельно допустимых смещений реперов фиксируют в момент отрыва гибкой связи и используют в дальнейшем для прогноза обрушений массива по сохранившимся в работоспособном состоянии реперам.

СКВАЖИННЫЙ ИНКЛИНОМЕТРИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ КОНТРОЛЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СДВИЖЕНИЙ МАССИВА

Одним из основных параметров, характеризующих процесс сдвижения подрабатываемой толщи горных пород или закладочного массива, является величина вертикальных сдвижений (осадок). Определение прогиба контролируемого массива в процессе развития горных работ возможно путем вычисления разности конечного и начального профилей оборудованной в нем обсаженной измерительной скважины, восстановленных по данным инклинометрических измерений.

Для контроля вертикальных сдвижений подрабатываемого массива разработана скважинная инклинометрическая система, включающая скважинный зонд, досылочные штанги, устройство преобразования и передачи данных на ПК с программным обеспечением для обработки данных [25].

По результатам лабораторных и натурных испытаний экспериментального образца инклинометрического комплекса проведена его модернизация. В конструкции скважинного зонда установлены датчики углов наклона немецкой фирмы Seika с защитой IP65, разрешением 0.005° и линейностью показаний по всему диапазону измерений $\pm 0.06^\circ$. Электронная микропроцессорная измерительная схема помещена внутри зонда. В корпусе установлен также цифровой датчик температуры, позволяющий контролировать температуру измерительной части комплекса и реализовать программную коррекцию сигналов от инклинометров [25].

Электронная схема преобразования аналоговых сигналов от инклинометров и температурного датчика позволяет передавать данные в цифровом виде. Связь с планшетным компьютером обеспечивает устройство преобразования сигналов из стандарта RS-485 в сигналы радиоканала.

Программное обеспечение микропроцессора, блок-схема которого представлена на рис. 2, позволяет осуществлять последовательный циклический опрос сигналов от датчиков и контроль напряжения питания через коммутатор каналов.

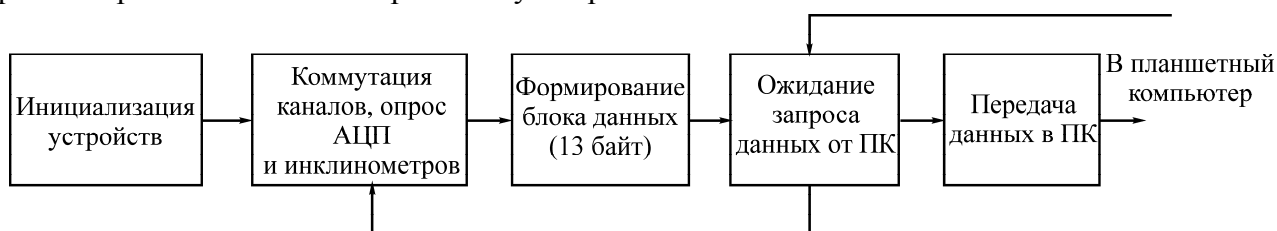


Рис. 2. Блок-схема модулей программного обеспечения работы микропроцессорной системы скважинного зонда

Проведенная модернизация зонда, электронных схем и программного обеспечения позволяет:

- увеличить точность измерения углов наклона в точках измерения;
- повысить производительность проведения эксперимента за счет сокращения числа опросов для усреднения показаний в каждой точке измерений до 2 с;
- исключить влияние соединительного кабеля на достоверность данных путем применения дискретной передачи сведений от скважинного зонда к устройству преобразования сигналов;
- упростить технологию реализации опыта с обработкой результатов в шахтных условиях.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ

СКВАЖИННОГО ИНКЛИНОМЕТРИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Контроль состояния предохранительного целика под Метегеро-Ичерским водоносным комплексом на руднике Интернациональный АК “АЛРОСА” осуществляется в соответствии с комплексным проектом гидрогеомеханического мониторинга. В его состав входят наблюдения за сдвижением закладочного массива в верхней части блока, обрабатываемого с использованием слоевой нисходящей системы разработки. С этой целью в центральной части закладки разрезного слоя, расположенного вдоль нижней границы предохранительного целика, выбурена скважина глубиной 45 м, обсаженная полиэтиленовой трубой с внутренним диаметром 90 мм.

Вертикальные сдвигения закладочного массива при послойной отработке нижележащих запасов контролировались путем проведения режимных наблюдений с применением разработанного инклинометрического комплекса. Результаты наблюдений свидетельствуют о достаточной для практических целей точности определения осадок разрезного слоя. Установлено, что процесс сдвижений закладки после отработки девяти 4.5-метровых слоев (2016 г.) продолжался с тенденцией затухания около одного года (рис. 3). В I квартале 2018 г. отмечена стабилизация осадок с образованием плоского дна мульды сдвижения на расстоянии 27–30 м от контакта рудной трубки с вмещающими породами. Максимальная осадка подстилающего целика слоя закладки от начала наблюдений составила около 520 мм (рис. 3).

Итоги мониторинга вертикальных сдвижений в процессе отработки запасов применялись в комплексе с другими контролируемыми параметрами для составления ежегодных заключений о безопасности ведения горных работ с точки зрения возможного прорыва рассолов через предохранительный целик.

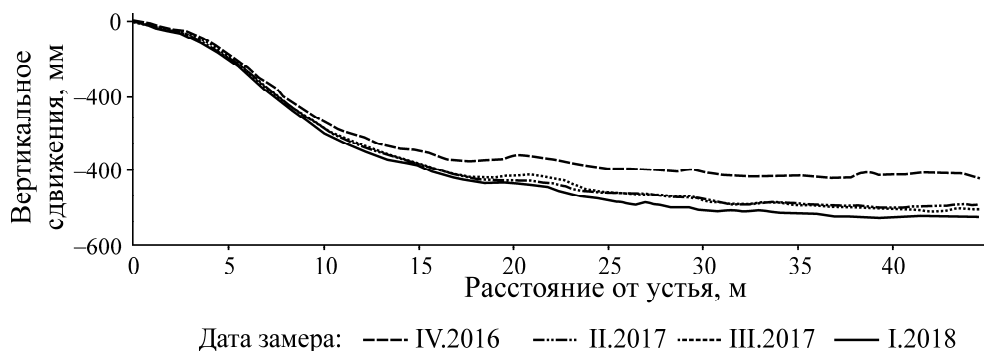


Рис. 3. Вертикальные сдвижения (осадки) закладочного массива разрезного слоя. Начальный отсчет 11.11.2013

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ СКВАЖИН

Разработанные программно-технические средства и способ прошли экспериментальную апробацию при определении напряженно-деформированного состояния соляной толщи пород, доломитов, бетонного массива и железобетонной обделки камер.

Для оценки возможности применения метода параллельных скважин в окрестности капитальных горных выработок в соляной толще пород на глубине около 650 м рудника Мир АК “АЛРОСА” проведен начальный цикл измерений [23]. Схема расположения станций в сбойке 1 гор. –310 м приведена на рис. 4.

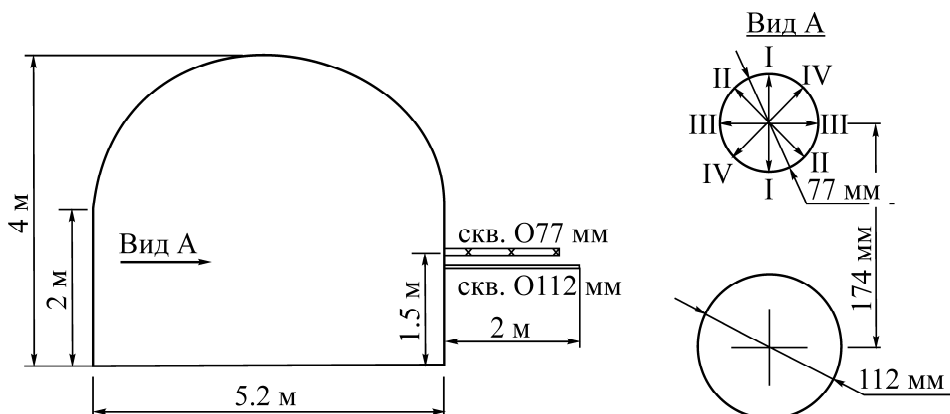


Рис. 4. Схема измерений в сбойке 1 гор. –310 м. I–I, II–II, III–III, IV–IV — направления измерений

На рис. 5 показаны радиальные смещения контура измерительной скважины по четырем разноориентированным направлениям при бурении возмущающей скважины (рис. 5а, б) и ее нагружении (рис. 5в, г). Плавные смещения в процессе опыта и стабилизация показаний после завершения бурения возмущающей скважины, а также линейная зависимость смещений от давления при кратковременном ее нагружении практически без остаточных смещений во время разгрузки свидетельствуют о доброкачественности опыта.

В табл. 1 приведены значения модуля $G_x = E / (4(1 - \nu^2))$, где E — модель упругости, МПа; ν — коэффициент Пуассона горной породы, а в табл. 2 и на рис. 4 — компоненты и квазиглавные напряжения на участке определения напряжений.

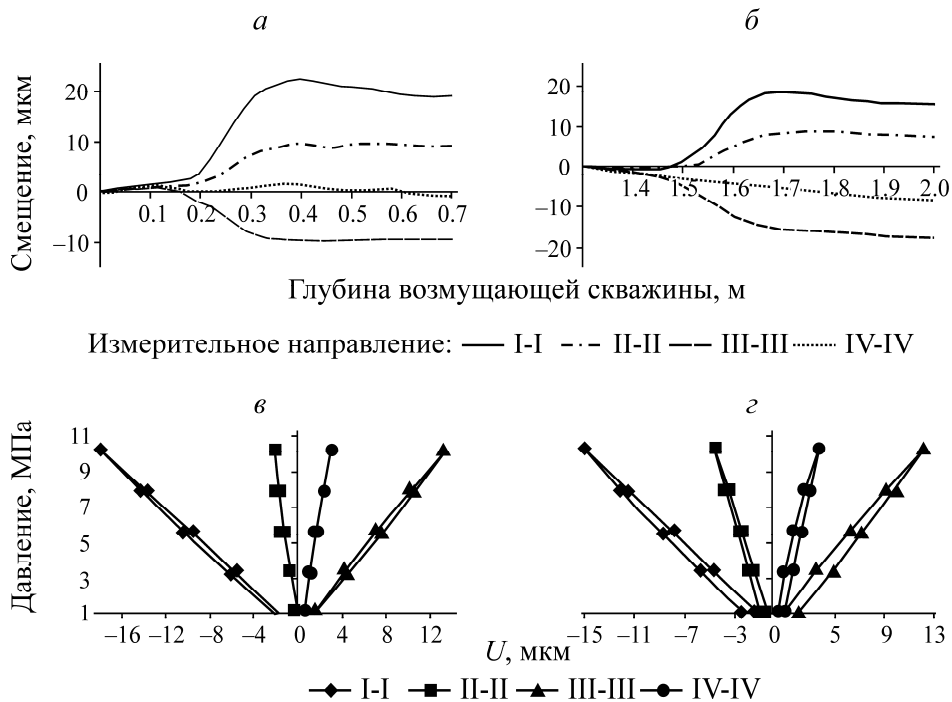


Рис. 5. Радиальные смещения контура скважины U (мкм) при бурении (a , b) и нагружении (v , z) возмущающей скважины на глубинах установки деформометра 0.35 м (a , v) и 1.65 (b , z)

Результаты определения модуля $G_{\text{э}}$ при нагружении возмущающей скважины демонстрируют корректность использования упругой однородной и изотропной модели при пересчете деформаций контура измерительной скважины в величины напряжений на всех участках установки деформометра. Об упругости массива свидетельствует линейная зависимость деформаций от нагрузок без значительных остаточных смещений; об однородности массива — отсутствие нарушений контура скважины; об изотропности — хорошее согласование значений модуля $G_{\text{э}}$ по всем измерительным направлениям деформометра, а также по трем опытам на глубинах измерений при среднеквадратическом отклонении результатов не более 7% (табл. 1).

Итоги расчета по величине $G_{\text{э}}$ модуля упругости E соляной толщи ($E = 13.8 - 17.1$ ГПа при $\nu = 0.3$) хорошо согласуются с его оценкой на образцах горных пород для соли Чарской свиты (14.6–19.6 ГПа) [26]. В табл. 2 и на рис. 6 приведены значения компонент и квазиглавных напряжений на участках измерений.

ТАБЛИЦА 1. Деформационные свойства массива на участках определения напряжений, МПа

Глубина измерения, м	Номер опыта	Нагрузка	Ветвь нагрузки			
			$G_{\text{э}}^*$, ГПа	E^{**}	$G_{\text{э}}^*$, ГПа	E
0.35	1	6.4	4.2 (3.8–4.7)	15.3	4.2 (3.8–4.6)	15.3
	2	10.2	3.8 (3.5–4.2)	13.8	3.9 (3.6–4.2)	14.2
0.98	1	10.2	4.2 (3.8–4.6)	15.3	3.9 (3.6–4.2)	14.2
	2	10.2	4.0 (3.7–4.3)	14.6	3.8 (3.6–4.2)	13.8
1.65	1	10.2	4.3 (3.7–5.0)	15.7	4.7 (4.1 ÷ 5.4)	17.1
	2	10.2	4.4 (3.8–5.2)	16.0	4.6 (4.0 ÷ 5.4)	16.7

Примечание. * — 90% доверительный интервал; $E = 3.64G_{\text{э}}$ при $\nu = 0.3$

ТАБЛИЦА 2. Результаты экспериментального определения напряжений

Глубина измерения, м	Компонент напряжения			Главные напряжения		Угол между горизонтом и σ_2 , град (**)
	σ_B (*)	σ_r (*)	$\tau_{вг}$ (*)	σ_1	σ_2	
0.35	-4.4 (0.6)	-9.7 (1.9)	-0.1 (0.3)	-4.4	-9.7	-2
0.98	-5.0 (0.1)	-16.6 (0.2)	-0.2 (0.0)	-5.0	-16.6	-1
1.65	-5.3 (0.2)	-17.8 (0.8)	-0.5 (0.1)	-5.3	-17.8	-2

Примечание. * — среднеквадратическое отклонение; ** — угол откладывается от горизонта против часовой стрелки

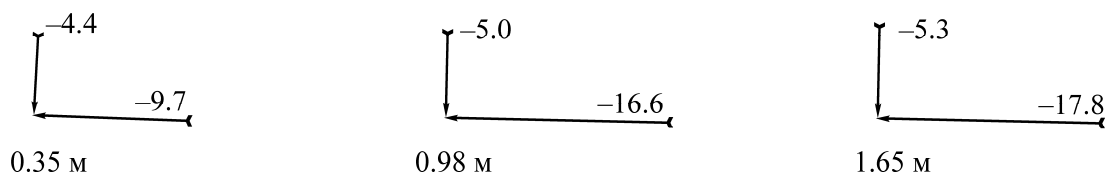


Рис. 6. Направления действия и значения квазиглавных напряжений (МПа) в вертикальной плоскости

Среднеквадратические отклонения компонент напряжений не превышают 20% (табл. 2), что вполне допустимо для экспериментальных оценок напряжений. Ниже приведены вертикальные напряжения σ_B^H и их расчетные значения σ_B^P при $\gamma H = 17.1$ МПа, определенные с учетом коэффициентов концентрации в окрестности сбойки в предположении упругого поведения массива:

Глубина, м	0.35	0.98	1.65
σ_B^P , МПа	-27.5	-27.4	24.8
σ_B^H , МПа	-4.4	-5.0	-5.3

Значительные расхождения измеренных и расчетных значений вертикальных напряжений в окрестности сбойки при прочности галита на сжатие ($\sigma_{сж} = 24.7$ МПа) свидетельствуют о формировании пластической зоны в приконтурном массиве. Горизонтальная составляющая напряжений вдоль продольной оси сбойки, сопоставимая с γH , отмечается на удалении ≈ 1 м от ее контура.

Апробация модернизированного измерительного комплекса проведена в 2017 г. в доломи-тах рудника Айхал АК “АЛРОСА” [27]. Актуальность исследований напряженно-деформированного состояния массива вызвана дальнейшим понижением горных работ и отсутствием информации о параметрах исходного поля напряжений, необходимой для выбора условий размещения и поддержания подготовительных выработок при переходе на систему разработки ромбовидными камерами с твердеющей закладкой [28].

На рис. 7 изображены радиальные смещения контура измерительной скважины в процессе реализации метода параллельных скважин, которые свидетельствуют о линейной их зависимости при нагружении и разгрузке возмущающей скважины без остаточных деформаций. В табл. 3 приведены значения вертикальной σ_B , горизонтальной σ_r и касательной $\tau_{вг}$ компонент напряжений, а также квазиглавных напряжений и их ориентации относительно горизонта (Γ) (рис. 8).

Расчетные значения вертикальной составляющей напряжений от веса налегающих пород (на глубине измерений $\gamma H = 10$ МПа) с учетом коэффициентов концентрации вблизи контура выработки в точках измерений (соответственно 1.66 и 1.59) составили -16.7 и -15.9 МПа.

Сравнение расчетных и экспериментальных вертикальных компонент напряжений показывает, что на глубине 0.6 м $\sigma_{\text{в}} = -12.8$ МПа меньше расчетного $\sigma_{\text{в}}^{\text{р}} = -16.7$ МПа, а на глубине 1.1 м $\sigma_{\text{в}} = -16.8$ МПа незначительно превышает $\sigma_{\text{в}}^{\text{р}} = -15.9$ МПа.

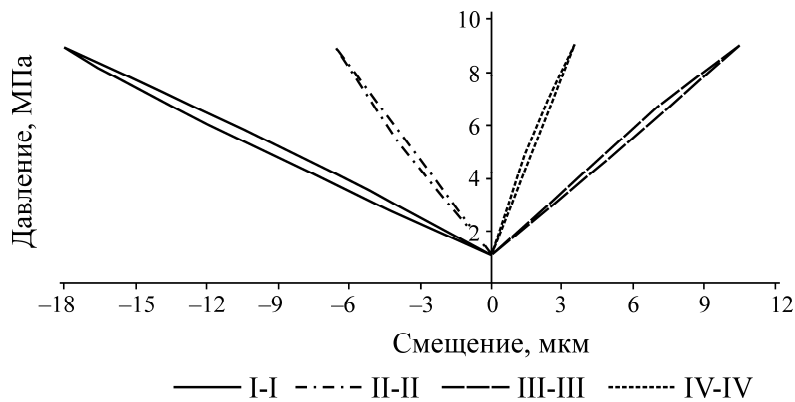


Рис. 7. Радиальные смещения измерительной скважины при нагрузке и разгрузке возмущающей скважины

Такое расхождение данных вызвано частичным ослаблением приконтурной части выработки, проводимой буровзрывным способом, о чем свидетельствует нарушения скважин (рис. 9). Значения горизонтальных составляющих напряжений вдоль оси выработок позволяют сделать предварительное заключение об отсутствии тектонических напряжений.

ТАБЛИЦА 3. Значения напряжений на станции замера напряжений, МПа

Глубина установки деформометра, м	$\sigma_{\text{в}}$	$\sigma_{\text{г}}$	$\tau_{\text{вг}}$	σ_1	σ_2	Угол между σ_2 и горизонтом, град
0.6	-12.8	-3.4	2.6	-2.7	-13.5	76
1.1	-16.8	-7.2	1.3	-7.0	-16.9	82

Проведенные исследования показали, что информация о напряжениях, полученная на контуре и в приконтурном массиве выработки, характеризует лишь их точечные значения на участке исследования и не позволяет корректно интерпретировать результаты для анализа напряженного состояния нетронутого массива. Для объективной оценки параметров исходного поля напряжений измерения следует проводить на удалениях от ослабленного и частично нарушенного контура выработки.

Метод параллельных скважин и разработанные программно-технические средства прошли также апробацию во время исследований напряженно-напряженного состояния железобетонной обделки подземных сооружений.

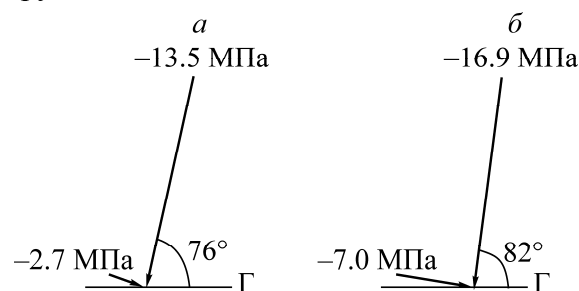


Рис. 8. Значения и направления действия квазиглавных напряжений на станции замера напряжений на глубине 0.6 (а) и 1.1 м (б)

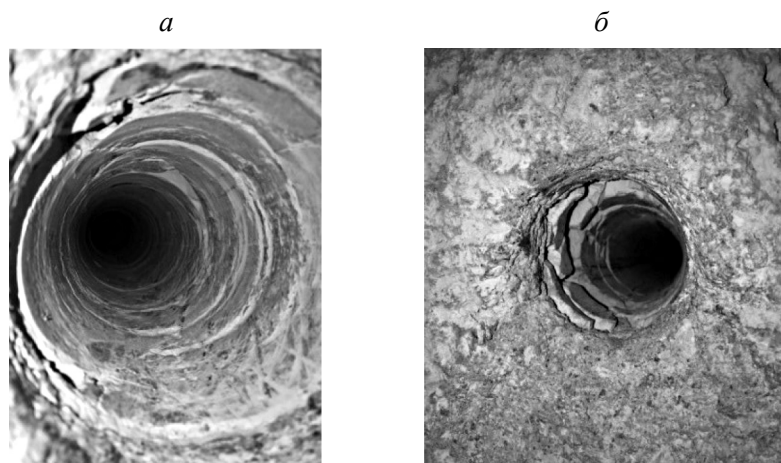


Рис. 9. Нарушения контура возмущающей (а) и измерительной (б) скважин

Опыт длительной эксплуатации подземных сооружений свидетельствует о том, что в большинстве случаев напряжения и деформации в бетонных обделках продолжают развиваться в течение продолжительного времени. Вопрос продления возможности дальнейшего их использования сверх назначенного (гарантированного) срока определяется по результатам комплексного обследования механического состояния элементов конструкций, заключающегося в употреблении инструментальных, визуальных и расчетных методов. Для повышения достоверности применения расчетных способов, обеспечивающих оценку предельных деформаций обделки до начала ее разрушения и определение срока безаварийной эксплуатации сооружения, требуется корректировка исходных параметров принятой расчетной модели по результатам экспериментального определения действующих напряжений в элементах конструкций на момент обследования.

Трудности реализации скважинных деформационных методов при оценке напряженно-деформированного состояния железобетонной обделки вызваны следующими причинами: расчетный аппарат методов основан на использовании уравнений теории упругости в предположении сплошности упругой изотропной среды, что требует соответствия выбранного для измерений участка массива данным допущениям. В методе параллельных скважин этот вопрос решается в каждой точке измерений при нагружении возмущающей скважины; наличие в бетоне обделки различных неоднородностей (металлической аппаратуры, каверн и участков некачественного вибрирования бетона) не гарантирует достоверность оценок напряжений в таких зонах.

Экспериментальные средства позволяют получить “точечную” оценку напряжений, что требует представительного объема проводимых исследований с последующей статистической обработкой результатов. Минимизация количества исследований возможна при их проведении на наиболее нагруженных участках обделки, что обеспечивает верхнюю оценку напряжений и идет в запас при расчетах прочности сооружения.

Предложена и апробирована в промышленных условиях методология исследований напряженно-деформированного состояния подземных сооружений с железобетонной обделкой, предусматривающая предварительное георадиолокационное зондирование и визуальное скважинное обследование бетона. На рис. 10 представлены радарограммы, позволяющие выбрать участки эксперимента, при наличии пустот в зоне контакта “крепь – вмещающий массив” и арматуры, (рис. 11). На рис. 12 показаны схема реализации метода параллельных скважин и радиальные смещения контура измерительной скважины во время нагружения возмущающей скважины.

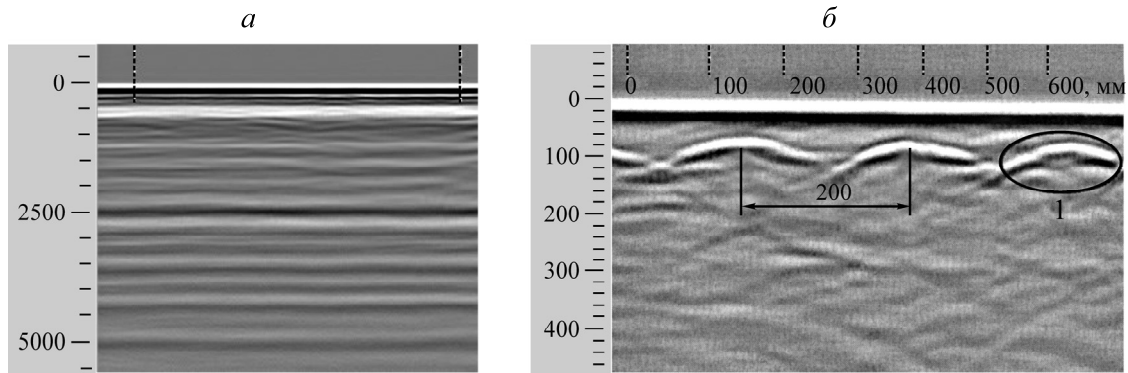


Рис. 10. Радарограмма, иллюстрирующая наличие пустот в зоне контакта “крепь – массив” (а) и определение шага армирования бетона (б)

По данным лабораторных испытаний деформационных свойств бетона по трем образцам керна диаметром 93 мм, отобранным при бурении возмущающей скважины, установлены средние показатели: модуль упругости $E = 22$ ГПа и коэффициент Пуассона $\nu = 0.20$.

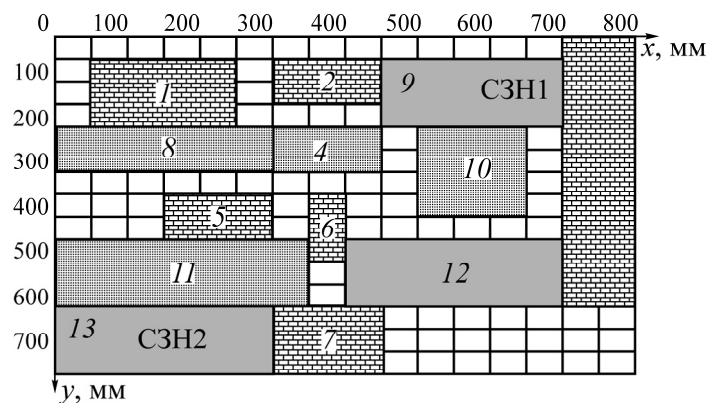


Рис. 11. Карта расположения неоднородностей: 1–3, 5–7 — металлическая арматура; 4, 8, 10, 11 — зоны разуплотнения бетона; 9, 12, 13 — зоны возможного расположения измерительных скважин. СЗН — станция замера напряжения

Получены экспериментальные значения модуля $G_{\text{э}} = E / (4(1 - \nu^2))$, компонент и квазиглавных напряжений на глубине 0.72 м от контура обделки. Расчетное значение модуля $G_{\text{э}} = 5730$ МПа, а расхождение с данными натуральных испытаний для станции СЗН1 при глубине установки деформометра 0.72 м и $G_{\text{э}} = 5300$ (450) МПа не превышает 8 %, что является дополнительным свидетельством качества натурального эксперимента. Соответствующие компоненты тензора напряжений и главные напряжения, МПа: $\sigma_{\text{вн}} = -2.6$ (0.3), $\sigma_{\text{ин}} = -2.7$ (0.3), $\tau_{\text{вг}} = 1.1$ (0.1) (в скобках приведены значения стандартного отклонения соответствующих величин), $\sigma_1 = -1.6$, $\sigma_2 = -3.7$ МПа. Угол между горизонтом и σ_2 , $\varphi = -54^\circ$. Приведенные результаты свидетельствуют о качестве выполненных оценок компонент напряжений со среднеквадратической погрешностью, не превышающей 11 %.

Таким образом, предложенная методология экспериментальных исследований и разработанные программно-технические средства позволяют проводить тестовые оценки напряженно-деформированного состояния железобетонных обделок для корректировки результатов расчетных методов, используемых для последующего анализа остаточного ресурса сооружений при наличии геомеханического мониторинга их состояний за предшествующий период эксплуатации.

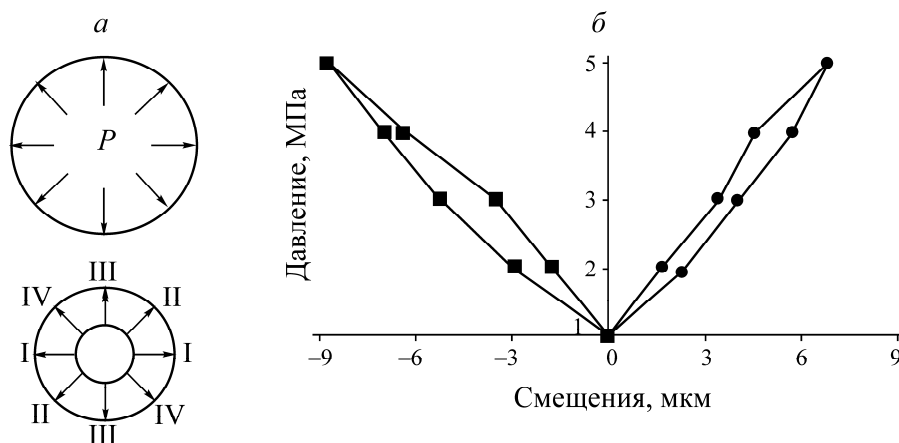


Рис. 12. Схема эксперимента при нагружении скважины давлением P (а) и соответствующие смещения контура скважины в измерительных направлениях I–I и III–III (б)

КОНТРОЛЬ И ПРОГНОЗ УСТОЙЧИВОСТИ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ РАЗРАБОТКИ

Предложенный способ контроля напряженно-деформированного состояния горных пород [10], основанный на измерениях продольных смещений реперов в наблюдательных скважинах, послужил основой для организации геомеханического мониторинга прибортового массива переходной зоны и подкарьерного предохранительного целика на руднике Айхал АК “АЛРОСА” (рис. 13, 14).

По результатам контроля устойчивости откосов при отработке законтурных запасов (рис. 13) установлен тип разрушающих деформаций, критическая скорость смещения массива (10–12 мм/сут) и продолжительность активной стадии его обрушения (10 сут), а также предельная величина смещений в момент его обрушения (238 мм).

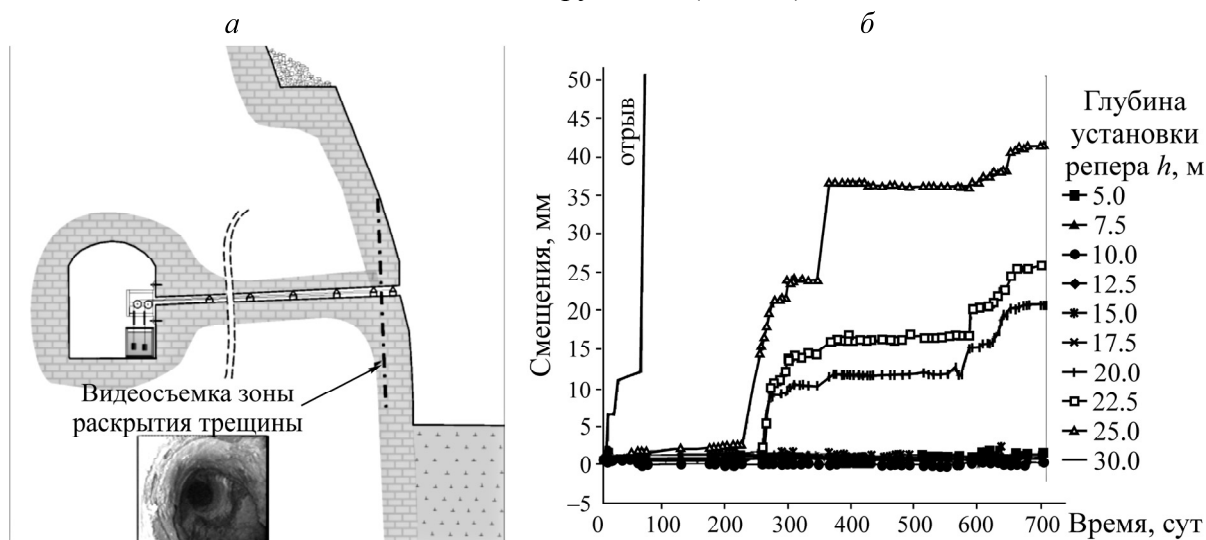


Рис. 13. Схема расположения (а) и графики смещений (б) реперов станции

Полученная информация послужила основой для последующего прогноза устойчивости формируемых откосов при понижении горных работ и принятия мер по обеспечению безопасности горных работ, что позволило отработать около 600 тыс. т законтурных запасов в борту карьера без укрепления откосов [5].

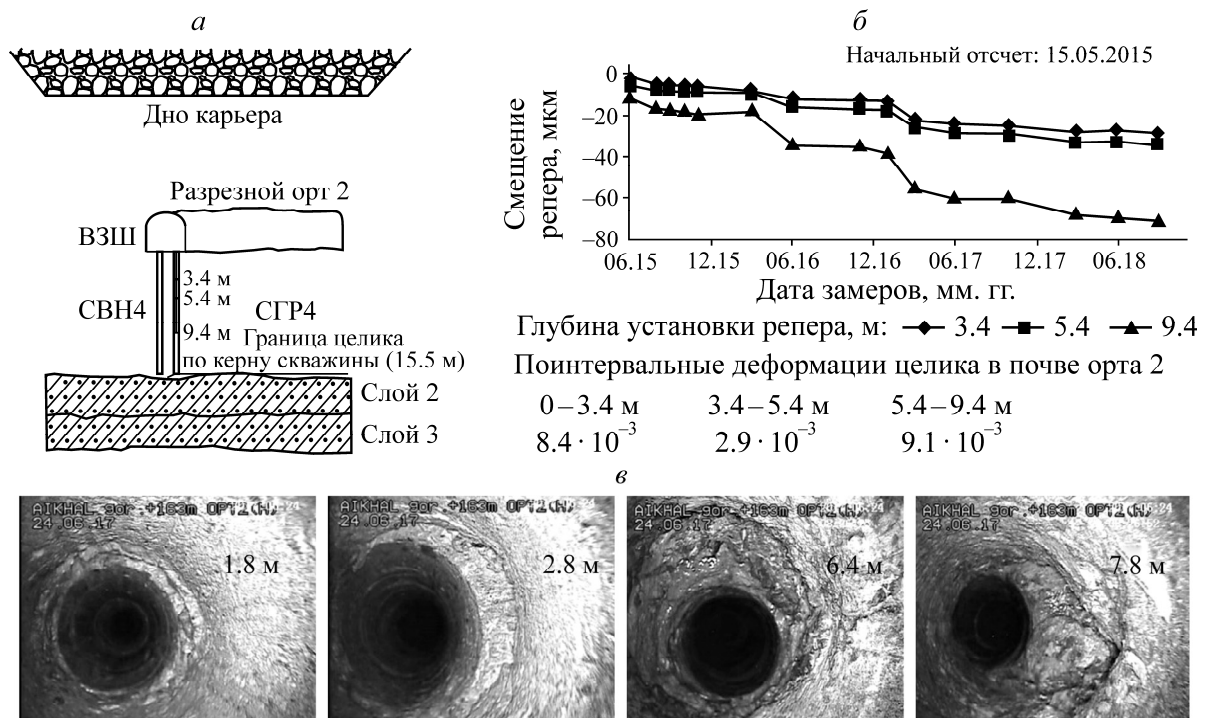


Рис. 14. Контроль состояния подкарьерного предохранительного целика: *а* — схема наблюдательной станции в вентиляционно-закладочном штреке (ВЗШ); *б* — вертикальные сдвигения реперов на станции глубинных реперов; *в* — разрушения контура скважины на станции визуальных наблюдений

Контроль состояния подкарьерного целика позволил установить величины поинтервальных деформаций рудного массива, повлекшие за собой его расслоение, о чем свидетельствуют разрушения контура контрольной скважины. С использованием информации по сдвигениям рудного массива подкарьерного целика на станциях глубинных реперов (СГР), визуальных наблюдений за состоянием контуров скважин (СВН) и осадкой реперов профильных линий проведена корректировка параметров расчетной модели, применение которой для численного моделирования напряженно-деформированного состояния рудного массива обеспечило определение предельных параметров его разрушения, оценку и прогноз геомеханического состояния целика на различных этапах отработки подкарьерных запасов.

ВЫВОДЫ

Разработаны программно-технические средства автоматизации измерений и обработки данных для определения методом параллельных скважин напряженно-деформированного состояния элементов конструкций в породном и бетонном массивах, обеспечивающие повышение точности получаемых оценок. Апробация способов на рудниках Айхал и Мир АК «АЛРОСА» и анализ напряженно-деформированного состояния железобетонной обделки подземных сооружений на Горно-химическом комбинате (г. Железногорск) свидетельствуют о надежности реализации и повышении производительности метода, включая оперативную обработку полученных данных непосредственно на месте проведения опыта.

Для контроля вертикальных сдвигений подрабатываемой толщи пород и закладочного массива созданы скважинная инклинометрическая система и программно-технические средства измерений и обработки информации в режиме реального времени. Данная система прошла успешную промышленную проверку и вошла в проекты гидрогеомеханических мониторингов на рудниках АК «АЛРОСА» (Институт «Якутнiproalmaz», 2018 г.).

Предложен способ контроля напряженно-деформированного состояния элементов конструкций, реализованный на руднике Айхал при мониторинге состояния прибортового массива в переходной зоне и подкарьерного предохранительного целика. Оценка и прогноз устойчивости формируемых откосов позволили безопасно отработать около 600 тыс. т. законтурных запасов и охранный целик вблизи действующего портала. Данный способ используется для наблюдения за состоянием конструктивных элементов разработки на рудниках АК «АЛРОСА» в период 2015–2018 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Bieniawski Z. T.** Estimating the strength of rock materials, *J. S. Afr. Min. Metall.*, 1974, Vol. 74. — P. 312–320.
2. **Mathews K. N., Hoek E., Wyllie D. C. and Stewart S. B. V.** Prediction of stable excavation spans for mining at depths below 1,000 meters in hard rock, *Golder associates report to Canada Centre for mining and energy technology (CAANMET)*, Department of energy and resources, Ottawa, Canada, 1980. — 216 p.
3. **Бульчев Н. С.** Механика подземных сооружений. — М.: Недра, 1989. — 270 с.
4. **Laubscher D. N.** A geomechanics classification system for the rating of rock mass in mini design, *J. S. Afr. Min. Metall.*, 1990, Vol. 90 (10). — P. 257–273.
5. **Hoek E., Wood D., and Shah S.** Modified Hoek-Brown criterion for Jointed rock masses, *Proc. ISRM Symp.: Eurock 92 Rock Characterization*, J. A. Hudson (ed), British Geotechnical Society, London, 1992. — P. 209–214.
6. **Barton N.** Application of Q-system and index tests to estimate shear strength and deformability of rock masses, *Workshop on Norwegian Method of Tunneling*, New Delhi, 1993. — P. 66–84.
7. **Гудман Р.** Механика скальных массивов. — М: Мир, 1971. — 254 с.
8. **Фисенко Г. Л.** Предельное состояние горных пород вокруг выработок. — М: Недра, 1976. — 220 с.
9. **Турчанинов И. А., Марков Г. А., Иванов В. И., Козырев А. А.** Тектонические напряжения в земной коре и устойчивость горных выработок. — Л.: Наука, 1978. — 256 с.
10. **Бенявски З.** Управление горным давлением. — М.: Мир, 1990. — 254 с.
11. **Виттке В.** Механика скальных пород. — М.: Мир, 1990. — 439 с.
12. **Guide to geotechnical instrumentation**, Published by Durham Geo Slope Indicator, Washington, 2004. — 52 p.
13. **Alireza Maghsoudi, Behzad Kalantari.** Monitoring Instrumentation in underground structures, *J. of Civil Engineering*, 2014, No. 4. — P. 135–146.
14. **Техника** экспериментального определения напряжений в осадочных породах / Курленя М. В., Аксенов В. К., Леонтьев А. В. Устюгов М. Б. — Новосибирск: Наука, 1975. — 105 с.
15. **Техника** контроля напряжений и деформаций в горных породах / Турчанинов И. А., Марков Г. А., Панин В. И. и др. — Л.: Наука, 1976. — 229 с.
16. **Марков Г. А.** Тектонические напряжения и горное давление в рудниках Хибинского массива. — Л.: Наука, 1977. — 213 с.
17. **Ардашев К. А., Ахматов В. И., Катков Г. А.** Методы и приборы для исследований проявления горного давления. — М: Недра, 1981. — 128 с.
18. **Курленя М. В., Попов С. Н.** Теоретические основы определений напряжений в горных породах. — Новосибирск: Наука, 1983. — 97 с.
19. **Hudson J. A., Cornet F. H., Christiansson R., Sjöberg J., and Haimson B. C.** ISRM suggested methods for rock stress estimation, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, 2003, Vol. 40, No. 7, 8. — P. 991–1025.

20. **Christiansson R., Janson T.** A test of different stress measurement methods in two orthogonal bore holes Aspo. Hard Rock Laboratory (HRL), Sweden, Int. J. of Rock Mechanics & Mining Sci., 2003, Vol. 40, No. 7, 8. — P. 1161–1172.
21. **Барышников В. Д., Барышников Д. В., Гахова Л. Н., Качальский В. Г.** Опыт применения геомеханического мониторинга при подземной разработке месторождений полезных ископаемых // ФТПРПИ. — 2014. — № 5. — С. 61–73.
22. **Пат. РФ № 2655512.** Скважинный многоканальный деформометр и автоматизированная система регистрации и обработки данных для определения напряженно-деформированного состояния массива горных пород с его использованием / В. Д. Барышников, В. Г. Качальский, Д. В. Барышников // Оpubл. в БИ. — 2018. — № 16.
23. **Барышников В. Д., Барышников Д. В., Гахова Л. Н.** К вопросу определения напряжений в соляной толще пород методом параллельных скважин // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017: XII Междунар. науч. конгр. — Новосибирск: СГУГиТ, 2017. — Т. 2. — С. 17–21.
24. **Пат. РФ № 2613229.** Способ контроля напряженно-деформированного состояния массива горных пород / В. Д. Барышников, Д. В. Барышников, А. С. Федянин, А. С. Чаадаев // Оpubл. в БИ. — 2017. — № 8.
25. **Пат. РФ № 2655512.** Скважинный инклинометрический зонд и скважинная инклинометрическая система для определения вертикальных сдвижений горных пород и залочного массива с его использованием / В. Д. Барышников, В. Г. Качальский, Д. В. Барышников // Оpubл. в БИ. — 2015. — № 22.
26. **Коноваленко В. Я.** Справочник физико-механических свойств горных пород алмазных месторождений Якутии. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. — 276 с.
27. **Барышников В. Д., Барышников Д. В., Хмелинин А. П.** К вопросу экспериментального определения напряжений во вмещающих породах рудника “Айхал” АК “АЛРОСА” // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2018: XIV Междунар. науч. конгр. — Новосибирск: СГУГиТ, 2018. — Т. 5.— С. 266–272.
28. **Пат. РФ № 2515285.** Способ разработки крутопадающих рудных тел с неустойчивыми рудами / Ю. А. Дик, А. В. Котенков, М. С. Танков, В. В. Минин, А. С. Кульминский, О. Ю. Аристов // Оpubл. в БИ. — 2014. — № 28.

Поступила в редакцию 01/VII 2019

После доработки 01/VII 2019

Принята к публикации 03/VII 2019