

ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАЗГРУЖЕННЫХ ЗОН ПРИ ЗАЩИТНОЙ НАДРАБОТКЕ РУДНОЙ ЗАЛЕЖИ

*К.т.н. Болтенгаген. И.Л., к.т.н Попов С.Н.
Институт горного дела СО РАН, Новосибирск, Россия*

Исследовано влияние параметров защитной надработки на границы разгруженных зон для условий талнахских месторождений медно-никелевых руд. Выполнялось численное моделирование методом конечных элементов и проводились экспериментальные исследования методом гидроразрыва скважин.

GEOMECHANICAL ANALYSIS OF DEFENSIBLE ZONE UNDER PROTECTIVE LAYER

*I.L.Boltenhagen, S.N.Popov
Institute of Mining, Novosibirsk, Russia*

A protective layer is widely used at the extraction of the thick slightly sloping rich deposits of copper-nickel ores at mines of North Siberia. A thin protective layer filled in with a solidifying mine-fill is forming in the roof of ore bodies. Longwall mining operations are carried out below the destressing seam in the protective zone. This paper presents the analysis on the influence of the protective layer parameters on the size and limits of the defensible zone. The numerical modelling by the method of finite elements was used. Some results of experiments in situ with hydraulic fracturing are discussed.

Введение

В результате выемки запасов полезных ископаемых Октябрьского месторождения с закладкой выработанного пространства на глубине 800-1300 м созданы искусственные массивы высотой около 30 м и размерами в плане (0.1-0.4)х1.0 км (рис.1). Для управления горным давлением вблизи очистных фронтов применяется опережающая защитная надработка, когда заполненный твердеющей закладкой защитный пласт формируется в кровле рудного тела, а очистные работы ведутся в разгруженной от напряжений области массива горных пород под защитным перекрытием. В горной практике защитные свойства разгружающего пласта характеризуются углами защиты, величины которых для условий пологих рудных тел Октябрьского месторождения определяются по результатам экспериментальных наблюдений за сдвигениями массива горных пород [1,2]. Вместе с тем теоретические оценки показывают, что величина угла защиты зависит в разной степени от модуля деформации закладочного материала, длины перекрытия, пролета отработки, угла падения рудной залежи, глубины горных работ. В работе приведены результаты численного моделирования методом конечных элементов, отражающие зависимость углов защиты от перечисленных выше факторов, и данные экспериментальных измерений методом гидроразрыва скважин.

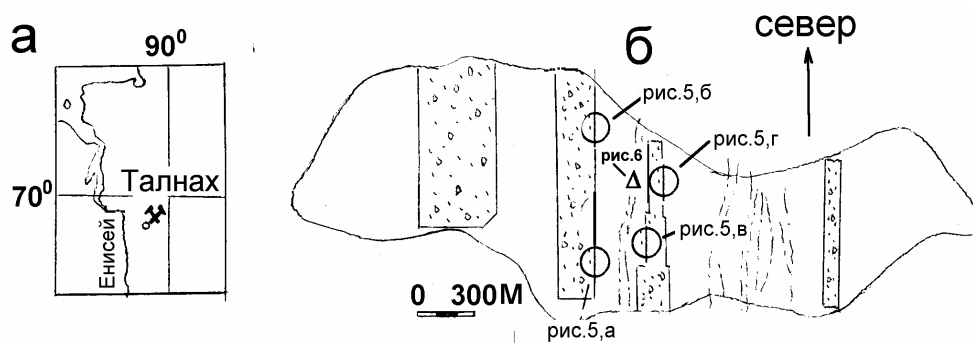


Рис.1. Положение на карте (а) и план (б) Октябрьского месторождения (О-замерные пункты для исследования защитных перекрытий, Δ – замерный пункт в области опорного давления).

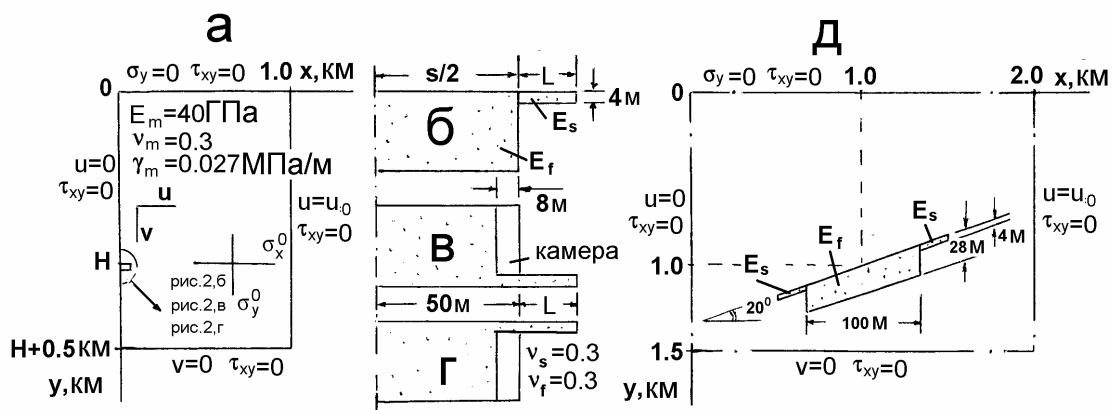


Рис.2. Схемы расчетной области для горизонтального (а,б,в,г) и наклонного (д) выработанного пространства.

Конечно-элементная модель

Двумерная упругая модель, не описывая всех особенностей деформирования массива горных пород вблизи очистного фронта, позволяет, тем не менее, оценить характер изменения размеров и границ разгруженных зон при варьировании различных параметров защитной наработки. На рис.2 приведены расчетные схемы. Первая схема (рис.2,а,б) использовалась для исследования зависимости угла защиты от модуля деформации E_s и длины L защитного перекрытия, пролета отработки S , глубины H горных работ и величины горизонтальных тектонических напряжений. Вследствие симметрии рассматривалась половина полной области решения. Постоянное горизонтальное перемещение u_0 на правой вертикальной границе расчетной области задавалось таким образом, чтобы отношение горизонтальных напряжений к вертикальным в начальном напряженном состоянии ($\lambda = \sigma_x^0 / \sigma_y^0$) было равным 1 или 2 на глубине залегания рудного тела H . Две следующие расчетные схемы (рис.2,в,г) применялись для анализа напряженного состояния массива горных пород при сплошной камерной системе разработки с применением защитного перекрытия в

кровле и в почве рудного тела. Четвертая схема (рис.2,д) использовалась для исследования размеров защищенных зон при ведении горных работ по падению и восстанию в случае наклонной залежи. Число узлов сетки конечных элементов – около 6000. Минимальный размер элемента вблизи защитного перекрытия равен 1м. При обсуждении результатов численного моделирования напряженного состояния массива горных пород приняты следующие определения. Защищенная (разгруженная) зона – это область, где максимальное главное напряжение не превышает значения начального вертикального напряжения на глубине 1 км (27 МПа). Зона разрушений – это область, где минимальные главные напряжения являются растягивающими

Результаты расчетов

На рис.3 приведены конфигурации защищенных зон и зон разрушения при различных параметрах компьютерной модели. Удобно сравнивать результаты моделирования с основным расчетным вариантом (горизонтальное выработанное пространство, $H=1$ км, $S=100$ м, $L=28$ м, $E_s=450$ МПа, $\lambda=1$), который показан на рис.3,а. Значения параметров, отличающихся от основного варианта, приведены на соответствующих рисунках. Разгруженная зона формируется по всей мощности рудного тела при длине защитного перекрытия 24-28 м (рис.3,а). Величина угла защиты (70^0 - 72^0) не изменяется при дальнейшем увеличении L . Снижение модуля деформации твердеющей закладки в защитном перекрытии от 750 до 450 МПа не влияет существенно на величину угла защиты (70^0), но при дальнейшем снижении жесткости закладочного массива угол защиты увеличивается до 75^0 (рис.3,б). Примечательно, что величина угла защиты не зависит от пролета отработки рудного тела (рис.3,в), а размер защищенной зоны существенно уменьшается с увеличением глубины горных работ или при более высоких горизонтальных начальных напряжениях (рис.3,г,д). Размеры и границы защищенной зоны существенно различаются при ведении горных работ по восстанию и по падению наклонного рудного тела (рис.3,е). В первом случае граница защищенной зоны почти вертикальна (87^0), а в случае создания разгружающего перекрытия по падению рудного тела угол защиты намного меньше (28^0).

Результаты сравнительной оценки устойчивости очистных выработок для вариантов сплошной камерной системы разработки с созданием опережающего защитного перекрытия в кровле и в почве рудного тела иллюстрирует рис.4. Конфигурация зон разрушения вблизи разгружающего пласта и очистных выработок при формировании перекрытия по почве рудного тела ($E_s=0$, $L=16$ м) и анализ величин растягивающих напряжений (порядка 10 МПа) позволяют сделать вывод о причинах появления растяжений в призабойном рудном массиве. Под- или надработанный защитным перекрытием рудный выступ в выработанное пространство срезается в процессе деформирования массива горных пород. Размеры зон разрушения уменьшаются с увеличением длины и жесткости защитного перекрытия. Видно, что соответствующие размеры зон разрушения меньше при формировании защитного перекрытия в кровле рудного тела. Однако в случае сплошной камерной системы разработки вариант создания защитного перекрытия в почве залежи может оказаться более предпочтительным по следующим причинам. Возможные вывалы в верхней части камеры могут приводить к обнажению закладочного массива и обрушению части защитного перекрытия в выработанное пространство. Разрушение бортов в нижней части камеры сопряжено с менее негативными последствиями. Экономические преимущества создания защитного перекрытия в почве рудного тела, резко возрастающие в определенных горно- геологических условиях (подобная ситуация сложилась, например, при ведении горных работ на руднике «Таймырский»), также делают более предпочтительным вариант создания защитного перекрытия в почве залежи. Наибольшую опасность при формировании перекрытия в почве залежи

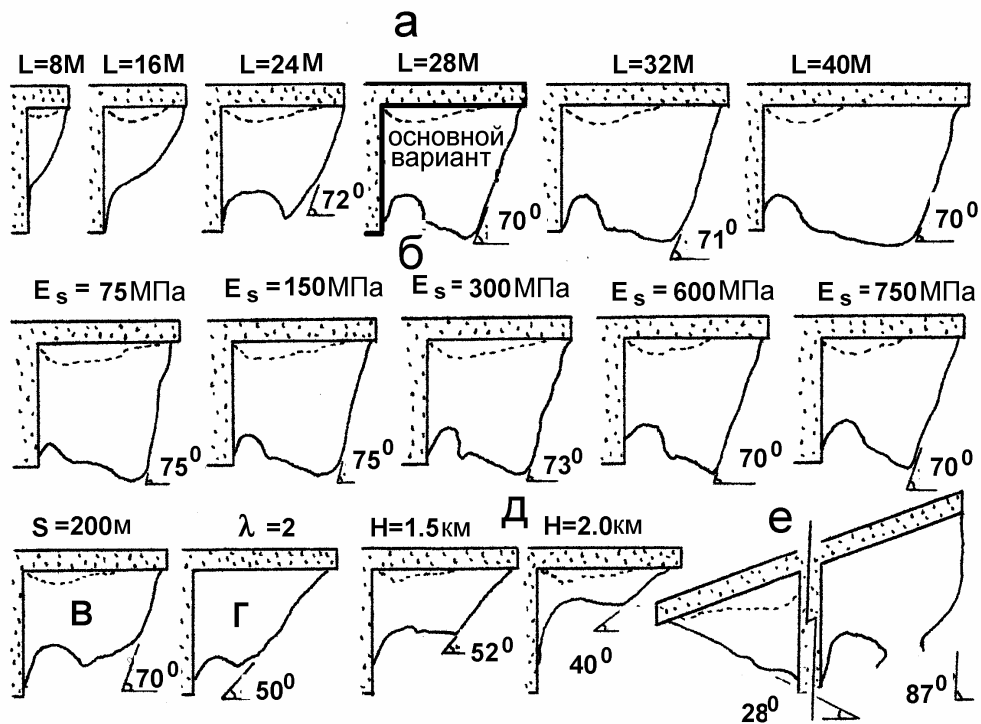


Рис.3. Конфигурации защищенных зон (сплошные линии) зон разрушения (пунктирные линии).

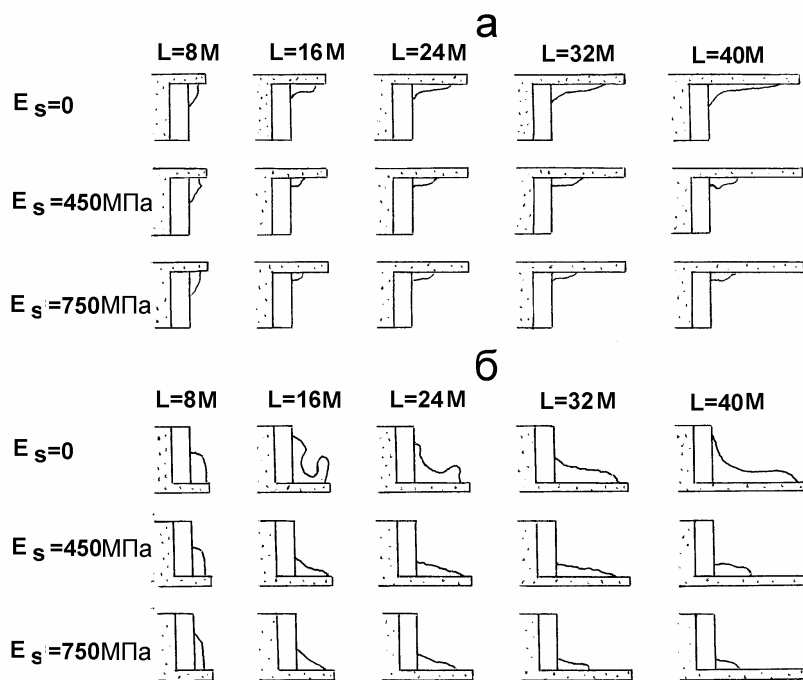


Рис.4. Зоны разрушения вблизи очистного фронта с защитным перекрытием в кровле (а) и в почве (б) рудного тела.

представляют разрушения в выработках, созданных в подработанном рудном массиве (в частности, в заездах, расположенных непосредственно над перекрытием, вприсечку). Вероятность неконтролируемых разрушений выработок может быть снижена дискретным разбиением подработанного массива искусственными вертикальными трещинами на блоки шириной, кратной размеру выемочной единицы (камеры).

Экспериментальные данные

Для определения границ защищенных зон в натуральных условиях выполнялись экспериментальные исследования методом гидроразрыва скважин. Используемая аппаратура и методика выполнения экспериментов описаны в работах [3-4]. Участок измерительной скважины герметизируется двухпакерным зондом и заполняется рабочей жидкостью до определенного давления P_0 . В течение заданного интервала времени (1 мин.) давление P_0 поддерживается пресс- расходомером на одном уровне и фиксируется расход жидкости ΔV . Затем подача жидкости в систему прекращается и фиксируется снижение давления ΔP за определенный период времени (1 мин.). При последующем быстром восстановлении уровня давления P_0 пресс- расходомером фиксируется инъецируемый объем жидкости Δv , который используется для эмпирической оценки сжимаемости системы. Эксперименты с целью определения фильтрационных свойств (нарушенности) массива проводились при давлениях $P_0=5$ МПа. Величина расхода жидкости ΔV и падения давления ΔP при одинаковом уровне P_0 во всех экспериментальных точках является относительной мерой нарушенности пород [5]. После завершения этапа определения фильтрационных свойств давление в гидросистеме повышается до предельного значения P_1 (давление разрыва скважины). Затем подача жидкости прекращается и регистрируется падение давления в межпакерном интервале. С течением времени (2-5 мин.) скорость спада давления затухает, уровень его стабилизируется (или почти стабилизируется) на отметке P_3 . Затем давление сбрасывается до нуля и с помощью ручного насоса вновь повышается до предельного значения P_2 (давление раскрытия трещины). После этого возможна еще одна фиксация давления стабилизации P_3' . Распределение экспериментальных значений по длине измерительных скважин характеризует изменение напряженного состояния и нарушенности горных пород в зависимости от местоположения относительно защитного перекрытия.

На рис.1 показаны места расположения четырех замерных пунктов на плане горных работ. На рис.5 приведены схемы размещения измерительных скважин в переходной области между незащищенной и разгруженной подработкой зонами массива горных пород и соответствующие результаты экспериментальных измерений. Уменьшение величин давлений свидетельствует о снижении напряжений в защищенной зоне. В табл. приведены оценки углов защиты по данным экспериментов.

Результаты экспериментальных измерений угла защиты

Табл.

Место выполнения экспериментов	Угол защиты $^{\circ}$
Рудник «Октябрьский», 11 панель / 183-187 ленты	72 $^{\circ}$
Рудник «Октябрьский», 7 панель / 187-191 ленты	86 $^{\circ}$
Рудник «Таймырский», 11 панель / 20-22 ленты	70 $^{\circ}$
Рудник «Таймырский», 9 панель / 17-19 ленты	Менее 80 $^{\circ}$

Эксперименты, кроме того, подтверждают наблюдаемую в практических условиях особенность, характерную для блочных массивов – межблоковые контакты, попадающие в область опорного давления, как бы образуют естественные границы

защищенных зон. Причем фактор блочности может оказывать определяющее влияние на формирование углов защиты. На рис.1 показано местоположение замерного пункта в области опорного давления на руднике «Таймырский». На рис.6 приведены схема размещения измерительных скважин на плане и разрезе и экспериментальные данные. В скважинах 1,2 зафиксирован низкий уровень давлений и высокая фильтрация, свидетельствующие о разгрузке надработанного рудного блока. Более высокие значения давлений в скважинах 3,4,5 отражают пригрузку массива в области опорного давления (24-28 ленты). Резкое снижение уровня давлений разрыва от 50 до 30 МПа в скважине 4 при пересечении геологического нарушения свидетельствует о существенном влиянии поверхности ослабления на распределение напряжений в сопряженных блоках массива.

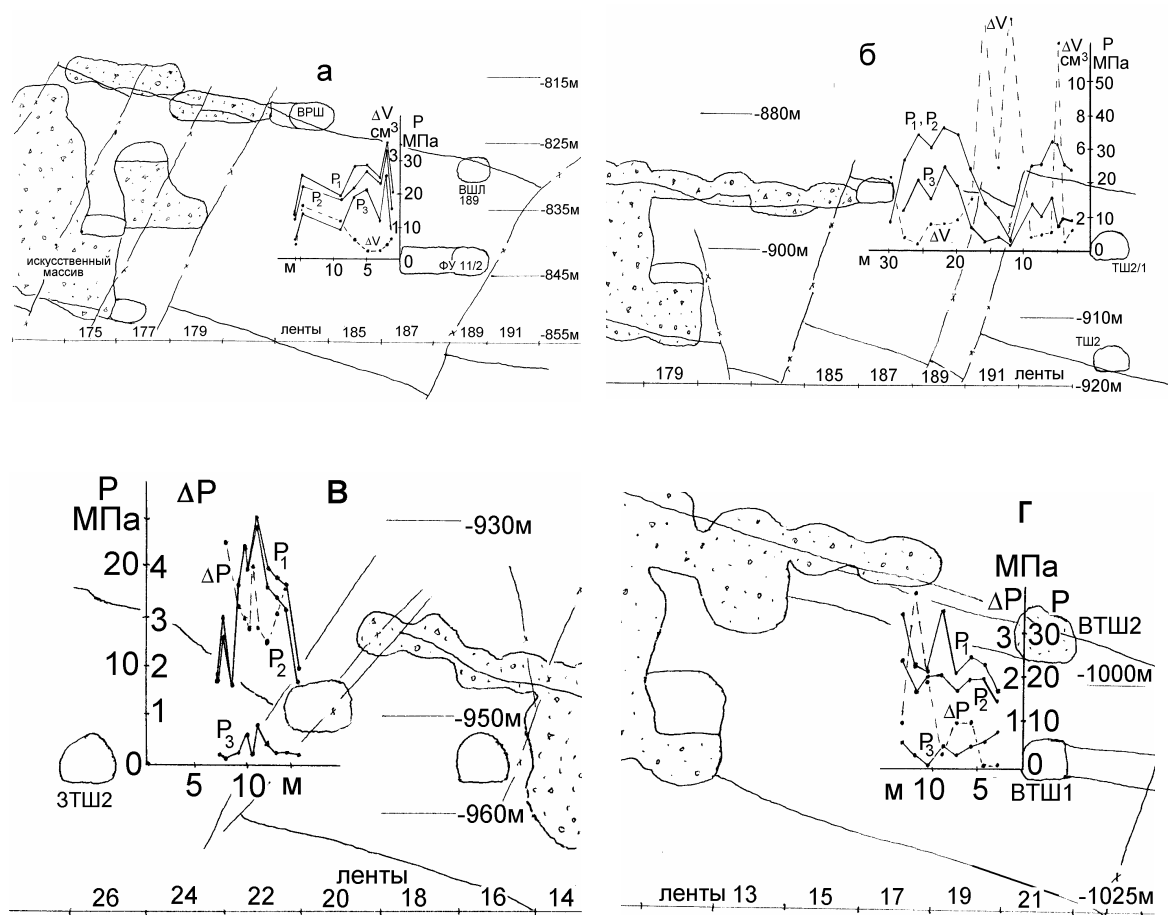


Рис.5. Размещение измерительных скважин вблизи защитного перекрытия и результаты экспериментов методом гидроразрыва скважин на руднике «Октябрьский» (а,б) и «Таймырский» (в,г).

Выводы

1. Защитная надработка служит эффективным средством управления горным давлением вблизи очистного фронта. Наряду со снижением уровня горного давления уменьшается также возможность опасных подвижек по нарушениям, попадающим в защищенную зону, и тем самым резко снижается вероятность неконтролируемых разрушений массива в области ведения очистных работ.

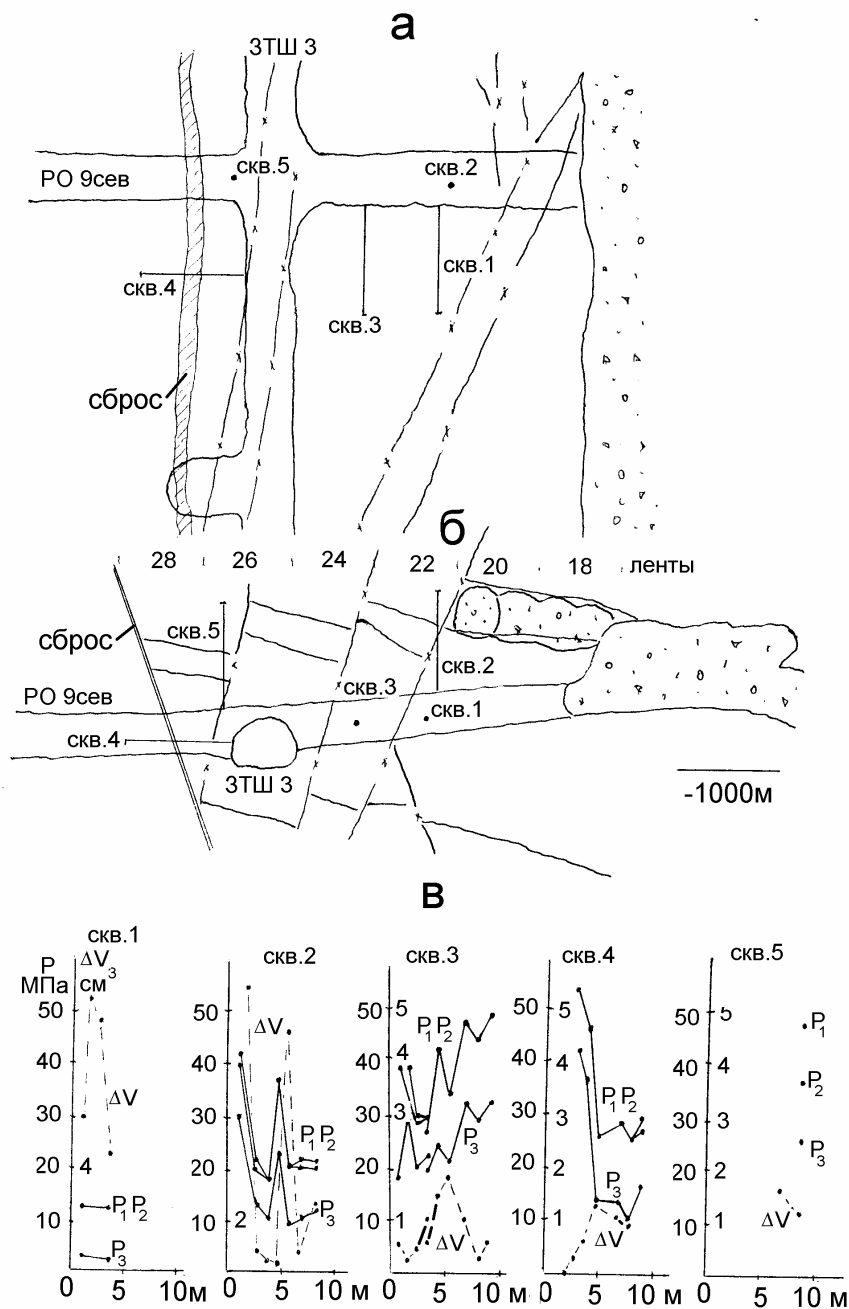


Рис.6. План (а) и разрез (б) местоположения заменого пункта вблизи фронта очистных работ на руднике «Таймырский»; результаты экспериментов по скважинам 1-5 (в).

2. Метод гидроразрыва является надежным средством инструментального определения границ защищенных зон в натуральных условиях. Выполненные измерения напряженного состояния позволили получить первые оценки границ защищенных зон.

3. Выявлен механизм формирования областей разрушения в рудном выступе, под- или надработанном опережающим защитным перекрытием: «срез» выклинивающегося в выработанное пространство выступа приводит к созданию растяжений, превышающих прочность горных пород и снижающих устойчивость очистных выработок.

4. При определенных требованиях к свойствам закладки (модуль деформации более 300-400 МПа) и длине перекрытия (более 24-28 м) возможно применение варианта создания защитного пласта по почве рудного тела.

5. Защитные свойства перекрытия характеризуются значением угла защиты, который для Октябрьского месторождения можно оценить величиной 70° . Защищенная зона формируется при длине перекрытия 24-28 м и дальнейшее увеличение его протяженности не изменяет угла защиты. Снижение модуля деформации закладки, используемой для формирования перекрытия, сопровождается незначительным увеличением угла защиты. Основными факторами, существенно уменьшающими размеры защищенных зон, являются повышенные значения горизонтальных тектонических напряжений и увеличение глубины горных работ. Величины углов защиты перекрытий, созданных по восстанию и по падению залежи, различаются весьма существенно.

Авторы благодарят начальников участков прогнозирования горных ударов рудников «Октябрьский» и «Таймырский» В.И.Урусова и В.Г.Масолова и научных сотрудников ИГД СО РАН Р.Юна и В.К.Федоренко за помощь в организации и проведении экспериментальных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петухов И.М., Линьков А.М., Фельдман И.А. и др. Защитные пласты. -Л.: Недра, 1972.

2. Петухов И.М., Линьков А.М., Сидоров В.С., Фельдман И.А. Теория защитных пластов. -Л.: Недра, 1976.

3. Попов С.Н., Федоренко В.К., Болтенгаген И.Л. и др. Характер деформирования межшахтного целика на руднике «Октябрьский» (Талнах) // Экспериментальные исследования напряженно- деформированного состояния массива шахт и рудников. – Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1990.

4. Курленя М.В., Леонтьев А.В., Попов С.Н. Развитие метода гидроразрыва для исследования напряженного состояния массива горных пород // ФТПРПИ.-1994.-№1.

5. Федоренко В.К., Болтенгаген И.Л., Тапсиев Г.А. Метод определения фильтрационных свойств горных пород // Напряженно- деформированное состояние массивов горных пород. –Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1988.