

## **ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ МАССИВОВ ОКТЯБРЬСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ МЕТОДОМ ГИДРОРАЗРЫВА СКВАЖИН**

**И.Л.Болтенгаген, В.К.Федоренко**

Институт горного дела СО РАН, Новосибирск, Россия

Обсуждаются результаты экспериментальных исследований методом гидроразрыва скважин. Эксперименты выполнялись в разделительных массивах Октябрьского месторождения. Получены оценки напряженного состояния. Установлено различие напряженного состояния тектонических блоков массива горных пород. Даны геомеханические рекомендации по отработке разделительных массивов.

Some results of experimental investigations with the hydraulic fracturing method are discussed. The experiments were carried out in the dividing massifs of Talnakhsky deposit. Stress state has been estimated. A difference of stress state of tectonic blocks of rock massif has been established. Some geomechanical recommendations for extraction of the dividing massifs are stated.

### **Введение.**

Залежь Октябрьского месторождения мощностью около 30 м и протяженностью с севера на юг порядка 1 км имеет восточное падение с углом около  $18^{\circ}$ . Рудное тело образовано тектоническими блоками шириной 10-80 м и длиной 60-200 м. Блоки ограничены крутопадающими (около  $80^{\circ}$ ) нарушениями с амплитудой смещения до 10 м. В результате сплошной выемки богатых руд Октябрьского месторождения на момент выполнения экспериментальных работ пролеты отработки в центральной части шахты 1 и шахты 2 рудника «Октябрьский» и на руднике «Таймырский» достигли соответственно 440-480 м, 160-200 м и 140-180 м. Выработанное пространство заполнено твердеющей закладкой. Поперечные размеры образованных разделительных массивов между шахтами 1 и 2 рудника «Октябрьский» (РМ 1), а также между шахтой 2 рудника «Октябрьский» и рудником «Таймырский» (РМ 2) составили соответственно 300-340 и 240-280 м. В западной части разделительного массива РМ 1 горные работы велись на горизонтах  $-770..-800$  м, в восточной – на горизонтах  $-870..-900$  м. В западной части РМ 2 горные работы велись на горизонтах  $-880 -910$  м, на востоке – на горизонтах  $-975 -1000$  м. В разделительном массиве РМ 2 находится горный сброс восточного падения с углом около  $75^{\circ}$  и амплитудой смещения до 60 м, удаленный от очистных работ в центральных панелях рудника «Таймырский» и шахты 2 рудника «Октябрьский» соответственно на 50 и 200 м.

На рис.1 в плане показаны заполненные закладкой выработанные пространства, образованные в результате выемки рудных запасов, и местоположение замерных станций для исследования напряженного состояния разделительных массивов методом гидроразрыва скважин.

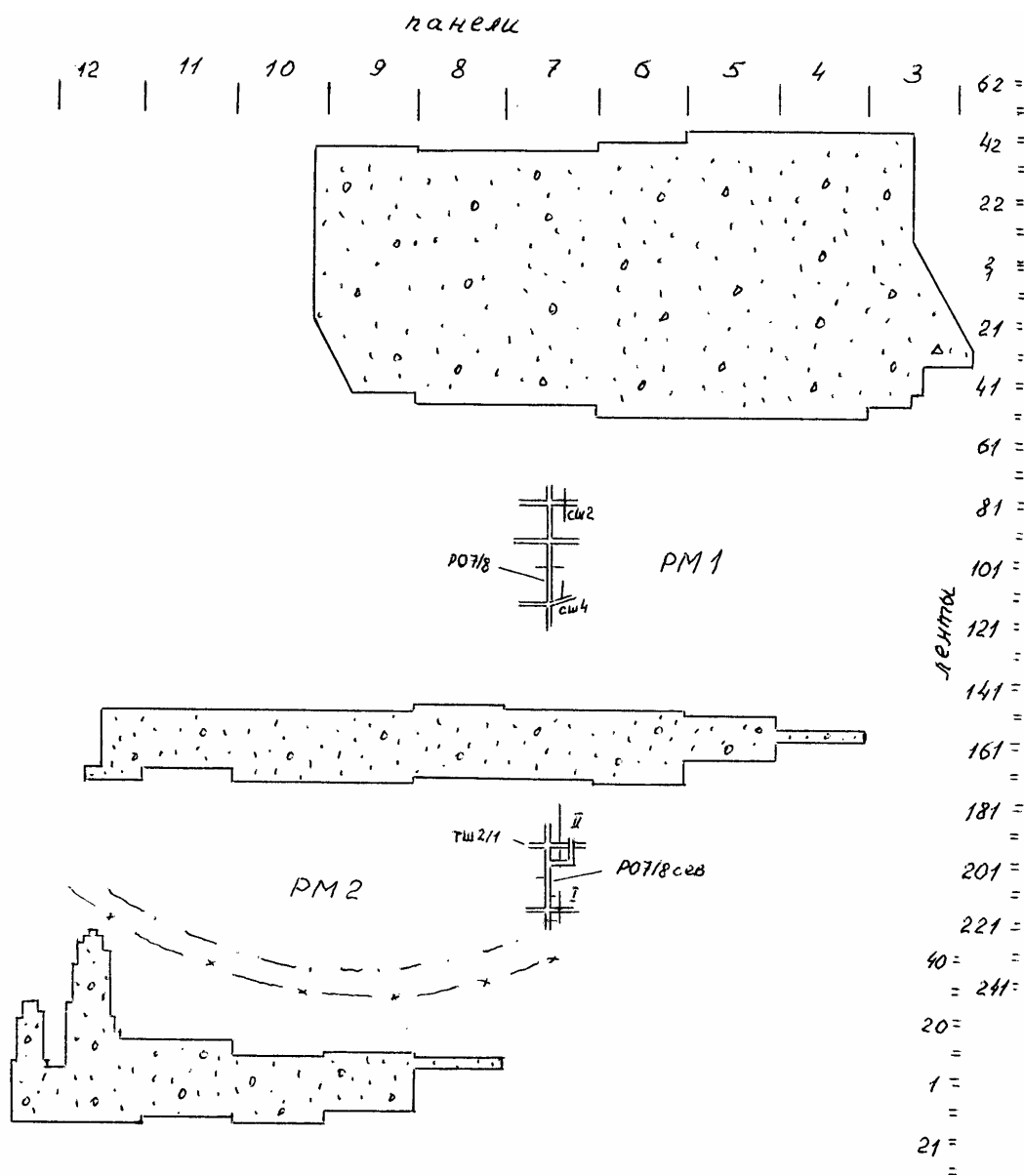


Рис.1. План рудников «Октябрьский» и «Таймырский» (гор. -1050 м), местоположение замерных пунктов и измерительных скважин.

### Экспериментальная схема и расчетная методика.

Использованное экспериментальное оборудование и схема экспериментов изложены в работах [1,2]. Участок измерительной скважины герметизировался двухпакерным зондом и заполнялся рабочей жидкостью (машинное масло) до определенного давления  $P_0$ . В течение заданного интервала времени (1 мин.) давление  $P_0$  поддерживалось пресс-расходомером на одном уровне и фиксировался расход жидкости  $\Delta V$ , необходимый для поддержания данного уровня давление в течение этого промежутка времени. Затем подача жидкости в систему прекращалась и фиксировалась изменение давления  $\Delta P$  за определенный период времени (1 мин.). Эксперименты с целью определения фильтрационных свойств (нарушенности) массива проводились

при давлениях  $P_0=5$  МПа. Величина расхода жидкости  $\Delta V$  и падения давления  $\Delta P$  при одинаковом уровне  $P_0$  во всех экспериментальных точках является относительной мерой нарушенности пород [1].

После определения фильтрационных свойств давление повышалось до предельного значения  $P_1$  (давление разрыва скважины). Затем подача жидкости прекращалась и регистрировалось падение давления в межпакерном интервале. С течением времени (2-5 мин.) скорость спада давления снижалась, уровень его стабилизировался (или почти стабилизировался) на отметке  $P_3$  (давление стабилизации). Затем давление сбрасывалось (при необходимости производилось заполнение пресс-расходомера) и с помощью ручного насоса вновь повышалось до предельного значения  $P_2$  (давление раскрытия трещины). После этого возможна еще одна фиксация давления стабилизации  $P_3$ .

В случае совпадения направлений оси скважины и одного из главных напряжений  $\sigma_3$  давление раскрытия трещины связано с напряжениями зависимостью  $P_2=3\sigma_1-\sigma_2$  (при  $\sigma_1 \leq \sigma_2$ ). Разность  $P_1$  и  $P_2$  дает оценку прочности пород на растяжение, а давление стабилизации – оценку минимальной компоненты напряжений. Минимальное из главных напряжений в плоскости, перпендикулярной оси скважины, характеризуется давлением запирания, для которого имеется несколько способов определения по падающей ветви кривой “давление-время”, но в любом случае оно находится в интервале значений между  $P_2$  и  $P_3$  (скорость снижения давления по истечении двух минут после разрыва для талнахских руд в большинстве экспериментов соизмерима со скоростью спада давления за счет фильтрационных потерь в замкнутой гидросистеме). Следует отметить, что возможны случаи распределения исходных напряжений в скальном массиве, при которых давление разрыва в скважине может быть меньше минимального главного напряжения, или образование трещины может происходить перпендикулярно оси скважины. При анализе экспериментальных данных указанные возможности учитывались.

Основным экспериментальным параметром, использованным для определения напряжений, является давление раскрытия трещины  $P_2$ . При интерпретация экспериментальных данных при наличии трех взаимно ортогональных измерительных скважин использовался следующий подход. Пусть  $P_v$ ,  $P_H$ ,  $P_h$  – средние величины давления раскрытия трещины в скважинах, ориентированных соответственно в направлениях  $V$ ,  $H$  и  $h$ , а  $\sigma_v, \sigma_H, \sigma_h$  – соответствующие главные напряжения в массиве. Давления раскрытия трещины в скважинах определяются следующими соотношениями:  $P_v = \min(3\sigma_h - \sigma_H, 3\sigma_H - \sigma_h)$ ,  $P_H = \min(3\sigma_v - \sigma_h, 3\sigma_h - \sigma_v)$ ,  $P_h = \min(3\sigma_v - \sigma_H, 3\sigma_H - \sigma_v)$ . Из анализа шести возможных вариантов соотношения главных напряжений можно сделать следующие выводы. Соотношения полученных экспериментальных значений давлений раскрытия трещины в ортогональных скважинах определяют возможные варианты соотношения напряжений. В случае  $\min(P_v, P_H, P_h) = P_v$  соотношения напряжений ограничиваются следующими двумя возможными вариантами  $\sigma_H \geq \sigma_v \geq \sigma_h$  или  $\sigma_h \geq \sigma_v \geq \sigma_H$  и их значения определяются уравнениями  $\sigma_v = 1/2 (-P_v + P_H + P_h)$ ,  $\sigma_H = 1/2 (-3P_v + 3P_H + P_h)$ ,  $\sigma_h = 1/6 (-P_v + 3P_H + P_h)$  в первом варианте и уравнениями  $\sigma_v = 1/2 (-P_v + P_H + P_h)$ ,  $\sigma_H = 1/6 (-P_v + P_H + 3P_h)$ ,  $\sigma_h = 1/2 (-3P_v + P_H + 3P_h)$  во втором варианте. В случае  $\min(P_v, P_H, P_h) = P_H$  соотношения напряжений ограничиваются



расположена в 63 ленте, а в западной части – в 50 ленте. Граница защитного перекрытия в восточной части шахты 2 была расположена в 187 ленте, а на западе – в 145 ленте. Таким образом пролеты отработки в центральной части седьмой панели на момент выполнения экспериментальных работ составляли соответственно 450-460 и 170-180 м. Ширина разделительного массива равнялась 320-340 м. Расстояние от соединительных штреков СШ 4 и СШ 2 до ближайших защитных перекрытий составляло 110 – 120 м.

На рис.3 приведены результаты измерений в каждой из скважин данной серии экспериментов. Все эксперименты выполнены в границах одного тектонического блока, поэтому возможен совместный анализ экспериментальных данных по всем скважинам, ориентированным в направлениях по вертикали V, запад-восток Н и север-юг h. Соответствующие величины средних давлений раскрытия трещин и среднеквадратичных отклонений (в скобках) равны:  $P_v=18,8$  (0,3) МПа,  $P_H=27,3$  (0,7) МПа,  $P_h=29,7$  (1,7) МПа. Использование дополнительной информации о давлениях стабилизации в соответствующим образом ориентированных скважинах позволяет оценить величины напряжений в центральной части разделительного массива значениями  $\sigma_v=19$  МПа,  $\sigma_H=28$  МПа,  $\sigma_h=16$  МПа. Полученная оценка хорошо согласуется с выполненными ранее измерениями напряженного состояния массива [2,3] на руднике “Октябрьский”.

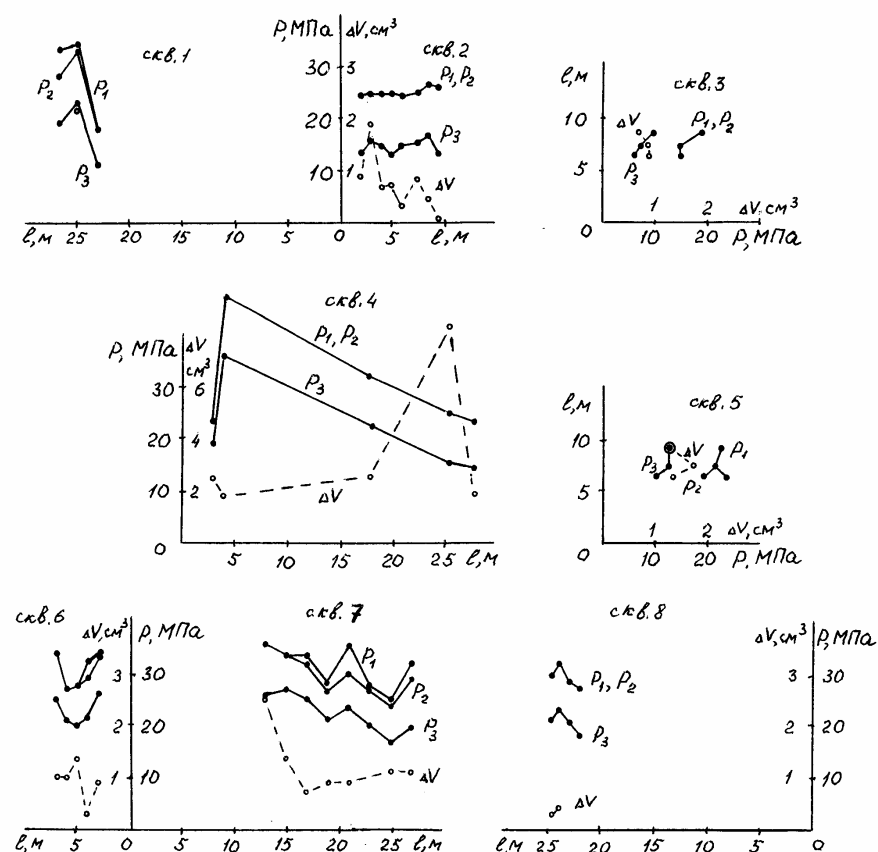


Рис.3. Распределение давлений разрыва ( $P_1$ ), раскрытия трещины ( $P_2$ ), стабилизации ( $P_3$ ) и расхода жидкости на фильтрацию в массив при давлении 5 МПа в течение 1 мин. ( $\Delta V$ ) по длине измерительных скважин в РМ 1.

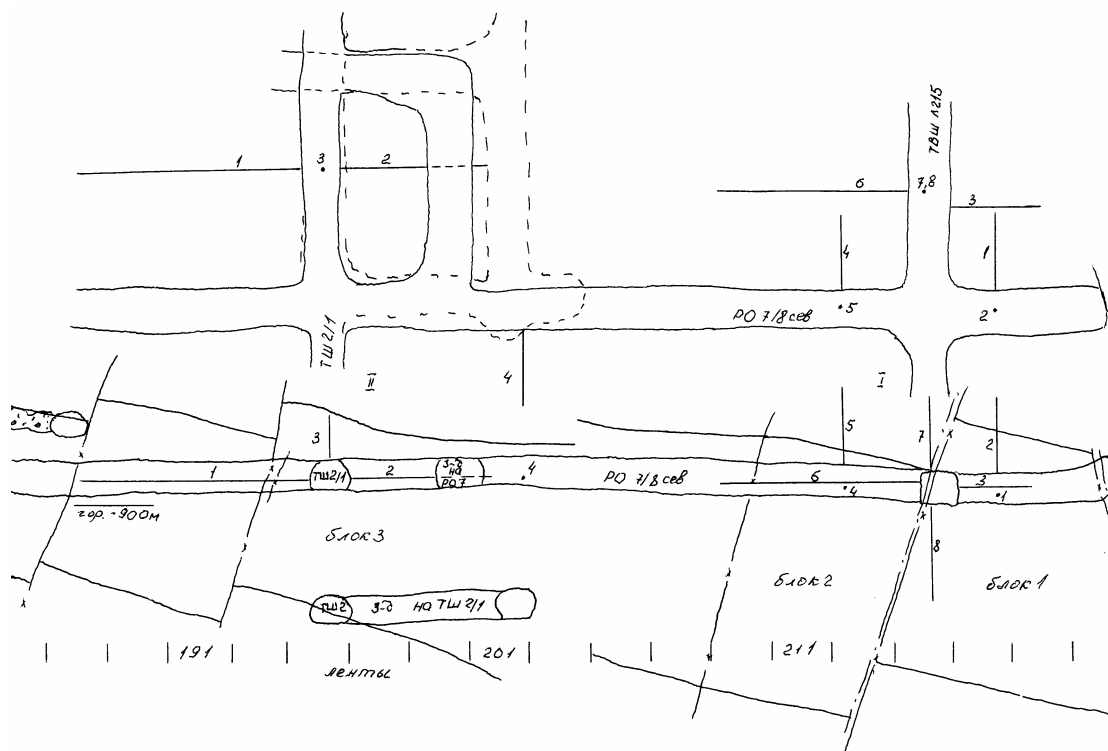


Рис.4. План, разрез и схема размещения измерительных скважин в РМ 2.

### Эксперименты в разделительном массиве между рудниками «Октябрьский» и «Таймырский» (РМ 2).

Эксперименты в РМ 2 выполнялись в поле шахты 2 рудника «Октябрьский» в середине седьмой панели. Первая серия экспериментальных работ проводилась в центральной части разделительного массива вблизи геологического сброса, вторая – у очистных работ. На рис.4 приведены план, разрез и схема размещения измерительных скважин в окрестности разведочного орта 7/8 сев. Граница защитного перекрытия в восточной части шахты 2 на момент измерений была расположена в 187 ленте, а на западе – в 145 ленте. Таким образом, пролет отработки в центральной части седьмой панели на момент проведения экспериментальных работ достигал 170 – 180 м. Расстояние от защитного перекрытия до транспортных выработок ТШ 2/1 и ТВШЛ 215 составляло соответственно 30 и 110 м. Эксперименты выполнялись в четырех тектонических блоках. Различие экспериментальных данных свидетельствует о существенной неоднородности распределения напряжений в блочном массиве.

На рис.5 приведены результаты измерений в каждой из скважин первой серии экспериментов. Эксперименты в вертикальных скважинах 7 и 8 выполнялись вблизи тектонического нарушения в области высоких градиентов напряжений и данные этих измерений не могут быть использованы для анализа напряженного состояния.

*Напряженное состояние первого блока.* В первом блоке зафиксированы следующие значения давлений раскрытия трещин и среднеквадратичные отклонения (в скобках) в соответствующих скважинах:  $P_v = 36,1 (1,8)$  МПа,  $P_H = 23,3 (0,5)$  МПа,  $P_h = 27,2 (1,3)$  МПа. Анализ полученных экспериментальных данных позволяет получить следующую экспериментальную оценку действующих в пределах первого тектонического блока напряжений:  $\sigma_v = 33$  МПа,  $\sigma_H = 20$  МПа и  $\sigma_h = 19$  МПа с абсолютной погрешностью около 1,5 МПа.

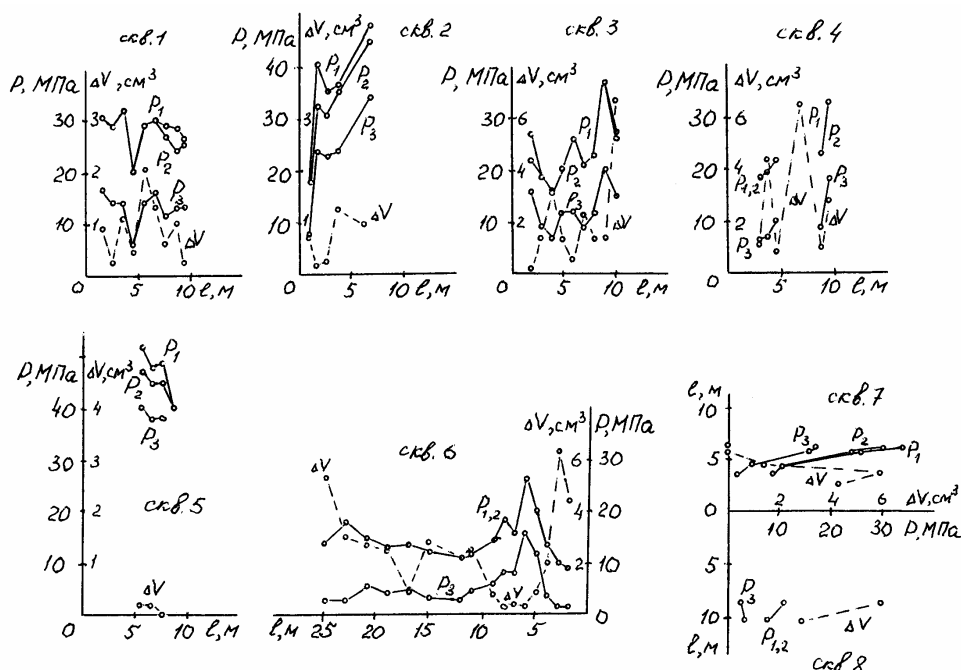


Рис.5. Распределение давлений разрыва ( $P_1$ ), раскрытия трещины ( $P_2$ ), стабилизации ( $P_3$ ) и расхода жидкости на фильтрацию в массив при давлении 5 МПа в течение 1 мин. ( $\Delta V$ ) по длине измерительных скважин в РМ 2 (серия экспериментов 1).

*Напряженное состояние второго блока.* Во втором блоке зафиксированы следующие значения давлений раскрытия трещин:  $P_v = 44,4 (2,5)$  МПа,  $P_H = 14,7 (1,5)$  МПа,  $P_h = 23,4 (2,5)$  МПа. Полученным экспериментальным данным соответствуют следующие значения напряжений во втором тектоническом блоке:  $\sigma_v = 56$  МПа,  $\sigma_H = 27$  МПа,  $\sigma_h = 24$  МПа, определенные с абсолютной погрешностью около 2 МПа.

*Напряженное состояние третьего блока.* На рис.6 показаны результаты измерений в скважинах второй серии экспериментов вблизи очистного фронта. Соответствующие значения давлений раскрытия трещин в третьем блоке равны:  $P_v = 15,5 (1,7)$  МПа,  $P_H = 14,2 (1,5)$  МПа,  $P_h = 21,9 (1,7)$  МПа. Полученные в результате значения напряжений:  $\sigma_v = 13$  МПа,  $\sigma_H = 12$  МПа,  $\sigma_h = 9$  МПа с абсолютной погрешностью около 1 МПа.

*Напряженное состояние массива вблизи защитного перекрытия.* Передовая выработка защитного перекрытия была создана за 2-2,5 месяца до проведения экспериментальных работ. Сразу же после единичного подвигания защитного слоя путем расширения на 2-3 метра передовой выработки было

выполнены четыре повторных измерения в скважине 1 (рис.6). На участке измерительной скважины, расположенным в непосредственной близости к защитному перекрытию, экспериментальные данные до и после подвигания перекрытия различаются (сплошные и штрихпунктирные линии на рис.6). В период проведения повторной серии измерений происходили интенсивные трещинообразования в массиве, которые воспринимались на слух и отражали динамику перераспределения горного давления в исследуемой области. Это показывает, что фактор времени необходимо учитывать при проведении шахтных исследований по определению границ разгруженных защитным перекрытием зон.

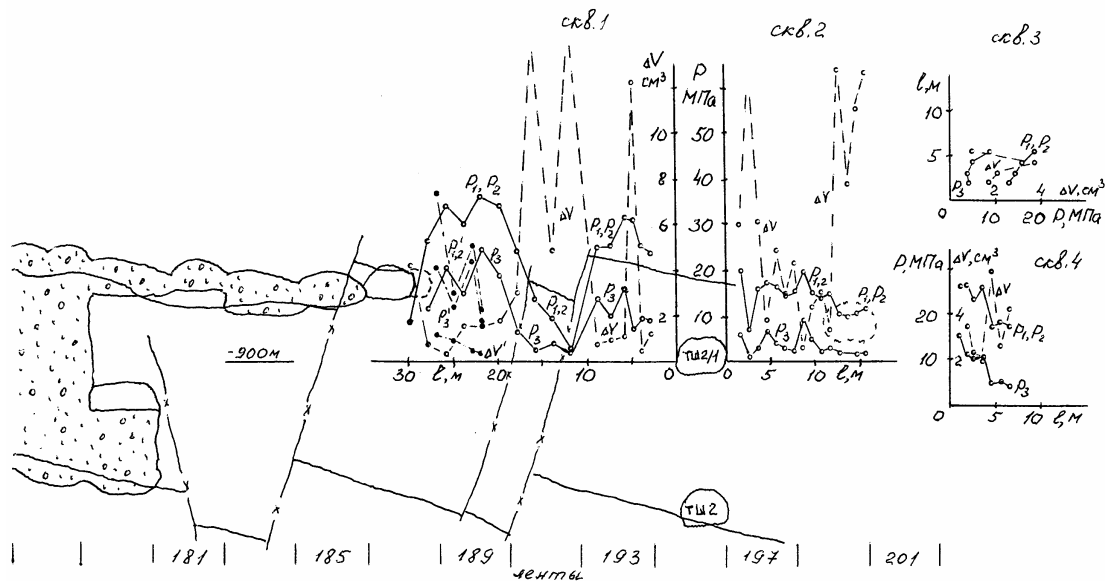


Рис.6. Результаты экспериментальных измерений вблизи очистного фронта в РМ 2 (серия экспериментов 2).

### Геомеханические рекомендации по ведению горных работ в разделительных массивах.

Качественный характер распределения опорного давления в разделительных массивах РМ 1 и РМ 2 различен. Если в западной части разделительного массива РМ 1 (восточное крыло шахты 1 рудника "Октябрьский") имеет место четкий максимум опорного давления на расстоянии около 50 м от защитного перекрытия [2], то в РМ 2 несущей областью является его центральная часть с максимальными значениями вертикальных напряжений  $2 \gamma H$  в районе 209-213 лент.

Отработка разделительного массива РМ 1 встречными фронтами шахт 1 и 2 сопряжена с повышенной опасностью динамических проявлений горного давления, вследствие сравнительно малой нарушенности и близкого расположения максимума опорного давления к очистному фронту. Поэтому из геомеханических соображений более предпочтителен вариант широтной разрезки разделительного массива РМ 1 с дальнейшей отработкой двумя расходящимися фронтами в северном и южном направлениях.

Повышенная тектоническая нарушенность, значительная протяженность зоны опорного давления в разделительном массиве РМ 2, разнесенность по



высоте горных работ на рудниках «Октябрьский» и «Таймырский» делают оправданной выемку разделительного массива РМ 2 сближающимися встречными фронтами с поочередным выходом панелей на крупноамплитудное нарушение, разделяющее поля рудников «Октябрьский» и «Таймырский».

Геомеханическая обстановка в РМ 2 будет определяться в основном поведением массива в окрестности крупноамплитудного геологического сброса. Горные работы на руднике «Таймырский» ведутся висячем боку. Поэтому при устойчивом режиме сдвиговых деформаций по сбросу можно ожидать постоянного уровня горного давления впереди очистного фронта без возникновения горных ударов в западном крыле рудника. Проведение долговременных наблюдений за сдвижением массива в окрестности сброса позволит вносить оперативные коррективы в порядок ведения горных работ в случае неблагоприятных задержек в развитии сдвиговых деформаций по сбросу.

Горные работы в западной части РМ 2 в поле рудника «Октябрьский» ведутся в лежачем боку, «под геологическое нарушение». С приближением очистных работ к сбросу существует вероятность зависания крупных блоков и внезапных динамических срывов. Поэтому для уменьшения опасности крупномасштабных горных ударов целесообразно приближаться к сбросу не одновременно во всех панелях.

### **Заключение.**

В центральной части разделительного массива РМ 1 зафиксировано следующее напряженное состояние:  $\sigma_v = 19$  МПа,  $\sigma_H = 28$  МПа,  $\sigma_h = 16$  МПа.

В сравнении с РМ 1 напряженное состояние разделительного массива характеризуется большей пригруженностью и неоднородностью распределения напряжений в тектонических блоках. Влияние горных работ распространяется на всю ширину разделительного массива. Максимальные напряжения зафиксированы в 209-213 лентях:  $\sigma_v = 56$  МПа,  $\sigma_H = 27$  МПа,  $\sigma_h = 24$  МПа. В непосредственной близости к крупноамплитудному тектоническому нарушению, разделяющему поля рудников «Октябрьский» и «Таймырский»:  $\sigma_v = 33$  МПа,  $\sigma_H = 20$  МПа,  $\sigma_h = 19$  МПа. Область разделительного массива между 193 и 201 лентами находится в состоянии необратимого деформирования вследствие локализованных сдвигов по имеющимся в массиве субвертикальным тектоническим нарушениям:  $\sigma_v = 13$  МПа,  $\sigma_H = 12$  МПа,  $\sigma_h = 9$  МПа.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

**1. 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.

**2. 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.

**3. Бронников Д.М., Замесов Н.Ф., Богданов Г.И.** Разработка руд на больших глубинах. –М.: Недра, 1982.