

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ГОРНОГО УДАРА ПО ТЕКТОНИЧЕСКОМУ НАРУШЕНИЮ ВБЛИЗИ ВЫРАБОТАННОГО ПРОСТРАНСТВА

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

**Аннотация:** Предложен способ прогнозирования динамического сдвига по тектоническому нарушению, основанный на расчете энергии деформации массива горных пород с помощью компьютерного моделирования горно-технической обстановки. Установлены прочностные параметры тектонического нарушения, определяющие возможность и энергию горного удара.

### Введение

Тектонические нарушения существенно влияют на распределение напряжений в массиве горных пород. Это обстоятельство непременно учитывается при геомеханическом обосновании отработки локальных участков месторождений вблизи нарушений. Вместе с тем, постепенное формирование больших выработанных пространств приводит к качественно иной ситуации, когда устойчивость тектонического нарушения сама начинает зависеть от интенсивности и масштабов техногенного воздействия. Настоящая статья посвящена исследованию поведения тектонического нарушения вблизи протяженного выработанного пространства. Методами компьютерного моделирования изучаются энергетические условия подготовки горного удара вследствие динамического сдвига берегов тектонического нарушения. Анализ выполнен применительно к конкретным условиям отработки мощных рудных тел Октябрьского месторождения.

### Конечно-элементная модель

Размеры расчетной области – 2х2 км (плоская постановка). Горизонтальное выработанное пространство высотой 25 м находится на глубине  $H$ , равной 1 км. Субвертикальное тектоническое нарушение с углом падения  $63,4^\circ$  пересекает расчетную область с верхней до нижней границы. Расстояние от границы выработанного пространства до тектонического нарушения на глубине 1 км варьировалось от 50 м до 10 м при изменении ширины выработанного пространства от 250 м до 290 м соответственно. Сравнивалось поведение тектонического нарушения при приближении к нему фронта работ со стороны лежащего и висячего боков. Начальное напряженное состояние

$$\sigma_x^0 = \gamma \frac{\nu}{1-\nu}(y-H) + 2\gamma H, \quad \sigma_y^0 = \gamma y, \quad \sigma_z^0 = \gamma \frac{\nu}{1-\nu}(y-H) + \gamma H$$

удовлетворяет данным экспериментальных измерений на руднике «Октябрьский» [1,2]: на глубине  $H$  горизонтальная компонента напряжений, ориентированная в направлении «запад-восток» в два раза превышает вертикальную компоненту, соответствующую весу налегающей толщи пород, а горизонтальная компонента напряжений, ориентированная в направлении «юг-север», равна вертикальной компоненте. В приведенных уравнениях  $y$  – расстояние от земной поверхности,  $\gamma$  и  $\nu$  – удельный вес и коэффициент Пуассона массива горных пород, равные  $0.027 \text{ МН/м}^3$  и  $0.25$  соответственно. Модуль упругости  $E$  равен  $40 \text{ ГПа}$ . Задачи решались методом конечных элементов в дополнительных смещениях при нулевой дополнительной деформация  $\Delta \varepsilon_z$  (обобщенная плоская деформация) и следующих граничных условиях: верхняя граница – свободна от напряжений, на нижней горизонтальной границе – нулевые дополнительные перемещения, на боковых вертикальных границах – нулевые касательные напряжения и горизонтальные компоненты вектора дополнительных смещений. Тектоническое нарушение моделировалось способом, изложенным в [3]. Сброс является внутренней контактной границей области со сдвоенными узлами, принадлежащими контактирующим подобластям, для которых, как обычно, определяются независимые системы линейных алгебраических уравнений относительно узловых дополнительных перемещений. Полная система уравнений формируется введением согласованных

граничных условий на контакте, обеспечивающих жесткое сцепление, раскрытие или сдвиг берегов нарушения. На рис.1,а показана схематичная зависимость касательного напряжения на поверхности тектонического нарушения  $\tau_n$  от относительного сдвига его берегов  $\delta$  при определенном нормальном сжатии  $\sigma_n$ , где  $\tau_p$  и  $\tau_o$  – предельная и остаточная сдвиговая прочностности нарушения, связанные с нормальным к поверхности напряжением  $\sigma_n$  пропорциональной зависимостью Амонтона – Кулона:

$$\tau_o = C + k\sigma_n \text{ и } \tau_p = C + k'\sigma_n .$$

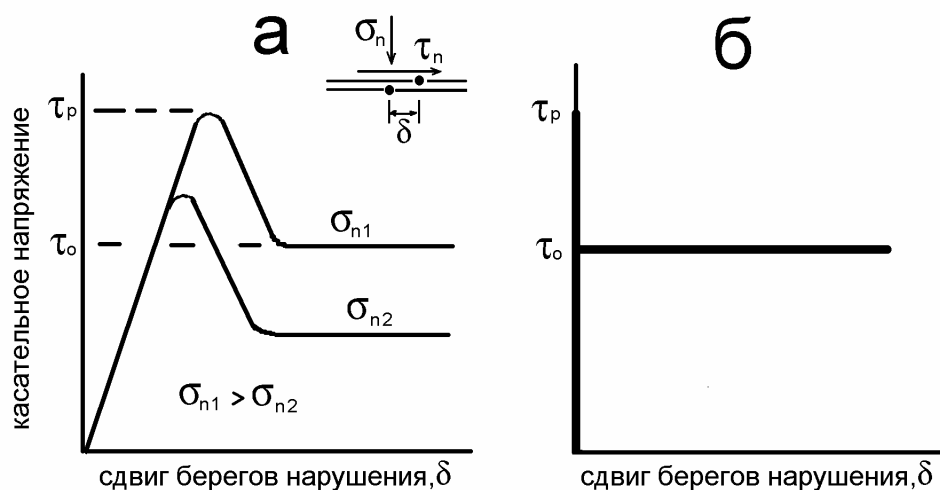


Рис.1. Сдвиг тектонического нарушения (а). Модель деформирования (б).

Сцепление  $C$  (порядка 1 МПа [4]) значительно меньше действующих в массиве напряжений (на глубине 1 км  $\gamma H$  около 30 МПа) и им можно пренебречь (в расчетах  $C$  принималось равным нулю). Таким образом, использовались следующие зависимости предельной и остаточной сдвиговой прочностности от нормального давления

$$\tau_o = k\sigma_n \text{ и } \tau_p = pk\sigma_n ,$$

где  $k$  – коэффициент трения по поверхности сместителя, а параметр  $p$  равный  $\tau_p/\tau_o$  определяет соотношение предельной и остаточной сдвиговой прочностности поверхности ослабления. Примененный способ моделирования тектонического нарушения не учитывает деформационные свойства контакта и рис.1,б иллюстрирует используемую диаграмму сдвига, определяемую только прочностными свойствами поверхности ослабления. Метод расчета напряженного состояния массива горных пород с тектоническим нарушением заключается в следующем. На предварительном этапе решается задача при жестком сцеплении узлов контактной границы, моделирующей тектоническое нарушение, фактически эквивалентная упругой модели поведения массива горных пород. Вычисляются распределения касательного и нормального напряжения на поверхности ослабления. На участке контакта, где касательное напряжение превышает предельное значение  $pk\sigma_n$  (зона сдвига), на следующей итерации в сдвоенных узлах задаются условия непрерывности нормальных к контакту компонент дополнительных смещений и связь нормальных и касательных компонент векторов поверхностных усилий  $\tau_n = k\sigma_n$ . Последующие итерации, как правило, сопровождаются увеличением размера зоны сдвига тектонического нарушения. Число итераций в каждой из решенных задач не превышало десяти. При высоких уровнях начальных горизонтальных напряжений и субвертикальных тектонических нарушениях раскрытие контакта невозможно (нормальные к поверхности ослабления напряжения во всех решенных задачах являются сжимающими). Общее количество узлов сетки треугольных элементов – 2738. На контактной границе расположено 2x64 узла. Размер минимального элемента – около 3 м. Система линейных уравнений решалась итерационным методом последовательной верхней релаксации.

## Результаты расчетов

Анализировались два варианта поведения тектонического нарушения при приближении к нему границ выработанного пространства:

1. внезапная потеря устойчивости и динамический сдвиг по поверхности нарушения с выделением запасенной энергии деформации в виде кинетической энергии волн;
2. постепенный сдвиг берегов нарушения, не сопровождающийся сейсмическими явлениями (крип).

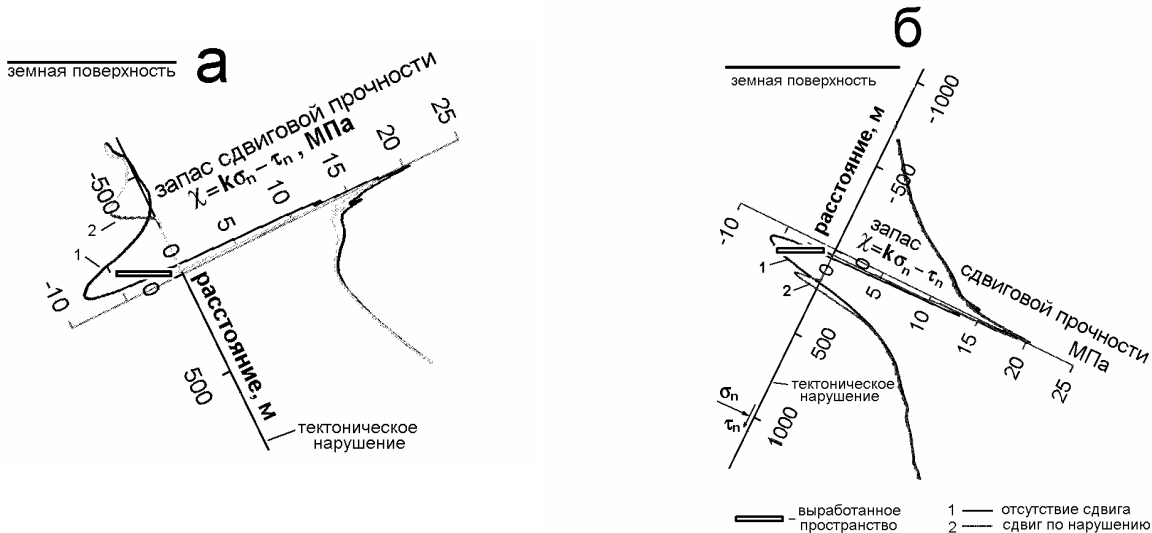


Рис.2. Запас сдвиговой прочности тектонического нарушения при приближении фронта горных работ со стороны лежачего (а) и висячего (б) бока.

Введем следующие обозначения:  $E_1$  и  $E_2$  – энергии деформации массива на начальном этапе при отсутствии сдвига берегов тектонического нарушения вблизи выработанного пространства и на заключительной стадии после подвижки,  $A$  – работа, совершенная массивом горных пород при сдвиге по сбросу от начальной стадии при условии жесткого сцепления берегов тектонического нарушения до конечной после относительного сдвигового смещения узлов в зоне сдвига. Первые две величины вычисляются следующим образом:

$$E = \frac{1}{2} \int \sigma \varepsilon dV,$$

где  $\sigma$  и  $\varepsilon$  – соответствующие компоненты тензоров напряжений и деформаций с учетом начального напряженного состояния, интегрирование осуществляется по объему расчетной области (в данном случае дискретизации на треугольные элементы суммированием вкладов каждого элемента). Вычисление работы требует некоторых пояснений. Касательные напряжения на поверхности тектонического нарушения в зоне сдвига зависят от уровня нормального давления. Расчеты показали, что сдвиг берегов тектонического нарушения от начальной до заключительной стадии сопровождается незначительным снижением уровня нормального напряжения в сравнении с изменением уровня касательного напряжения. Предполагая линейное изменение касательных напряжений на поверхности тектонического нарушения от  $\tau_1$  до  $\tau_2$  при сдвиге берегов поверхности ослабления от 0 до  $\delta$ , получим следующую оценку работы сдвига по поверхности тектонического нарушения

$$A = \frac{1}{2} \int_s (\tau_1(s) + \tau_2(s)) \delta(s) ds ,$$

где  $\tau_1$  и  $\tau_2$  – касательные напряжения на поверхности контакта на предварительной и заключительной стадии сдвига по тектоническому нарушению,  $\delta$  - величина относительного сдвига берегов тектонического нарушения и интегрирование осуществляется по поверхности зоны сдвига. При дискретизации области интегрирование сводится к суммированию узловых вкладов контакта в работу. Сдвиг по поверхности ослабления вблизи выработанного пространства приводит к разгрузке массива горных пород ( $E_2 < E_1$ ). Если разность энергий деформации  $E_1 - E_2$  превышает величину работы сдвига по тектоническому нарушению  $A$ , то относительное смещение берегов тектонического нарушения не сопровождается сейсмическими явлениями. Если разность  $E_1 - E_2$  больше величины работы  $A$ , то возможен динамический сдвиг по поверхности сброса с выделением запасенной энергии деформации в виде кинетической энергии волн.

ТАБЛИЦА. Энергетический баланс.

	Коэффициент трения, $k$	Изменение энергии $\Delta E = E_1 - E_2$ , МДж/м	Работа сдвига $A$ , МДж/м	Разность $A - \Delta E$ , МДж/м
Приближение горных работ со стороны лежачего бока	0.42	143.27	155.79	12.50
	0.40	179.28	194.87	15.59
	0.35	414.16	432.91	18.75
	0.34	4139.11	3972.45	-166.66
Приближение горных работ со стороны висячего бока	0.42	28.14	28.90	0.76
	0.40	38.39	39.26	0.87
	0.38	60.09	60.84	0.75
	0.36	75.08	75.52	0.45
	0.35	82.44	82.58	0.15
	0.34	90.11	89.89	-0.22
	0.33	159.02	155.08	-3.94

На рис.2,а показано распределение величины

$$\chi = k\sigma_n - |\tau_n|,$$

характеризующей запас сдвиговой прочности, на тектоническом нарушении при приближении границ выработанного пространства со стороны лежачего бока. Расстояние от фронта горных работ до сброса на горизонте  $-1000$ м равно 25 м. Соотношение предельной и остаточной прочности в данном случае равно 1.2, коэффициент трения равен 0.35. Кривая 1 соответствует предварительному расчету при жестком сцеплении берегов контакта, кривая 2 – заключительной стадии деформирования массива горных пород с относительным смещением берегов тектонического нарушения в зоне сдвига. Расстояние на графике отсчитывается от горизонта ведения горных работ. Предварительный расчет по упругой модели позволяет вполне удовлетворительно оценивать размеры зоны сдвига поверхности ослабления. В данном случае она находится над выработанным пространством и превышает 300м. Кроме этого на 200 – метровом участке величина  $\chi$  отрицательна, но величина предельной сдвиговой прочности не достигнута, поэтому на этом участке берега тектонического нарушения деформируются в условиях жесткого сцепления. Породы лежачего бока на контакте сдвигаются вниз относительно пород висячего бока. Сдвиг берегов тектонического нарушения достигает 110 мм. Рис.2,б иллюстрирует вариант приближения к нарушению границ выработанного пространства со стороны висячего бока при тех же значениях остальных расчетных параметров. В данном случае размер зоны сдвига не превышает 200 м и она находится под выработанным пространством. Породы висячего бока на контакте смещаются вниз относительно пород лежачего бока. Сдвиг берегов контакта не превышает 42 мм. Расчеты подтверждают, что приближение фронта горных работ к сбросу со стороны лежачего бока «под тектоническое нарушение» создает более сложную геомеханическую

обстановку. В табл. приведены расчетные данные о разности энергий массива горных пород  $\Delta E = E_1 - E_2$  и работе сдвига по контакту  $A$  при различных значениях коэффициента трения  $k$  по поверхности тектонического нарушения для вариантов ведения горных работ в лежащем и висячем боку. Остальные значения расчетных параметров соответствуют представленным выше. На рис. 3,а,б показаны величины разности  $A - \Delta E$  при различных значениях коэффициента трения. Для обоих вариантов ведения горных работ при коэффициенте трения, меньшем 0.35, приведенная разность отрицательна и возможен динамический сдвиг по поверхности тектонического нарушения. При коэффициенте трения, равном 0.34 около 0.2 МДж/м может выделиться в виде кинетической энергии волн при приближении фронта работ со стороны висячего бока и около 167 МДж/м – со стороны лежачего бока. Отметим, что во втором случае зона сдвига распространяется до земной поверхности. Таким образом, горные работы под тектоническим нарушением сопряжены с гораздо более высоким уровнем опасности динамических проявлений горного давления. Аналогичное значение критического значения коэффициента трения получено при других соотношениях предельной и остаточной сдвиговой прочности.

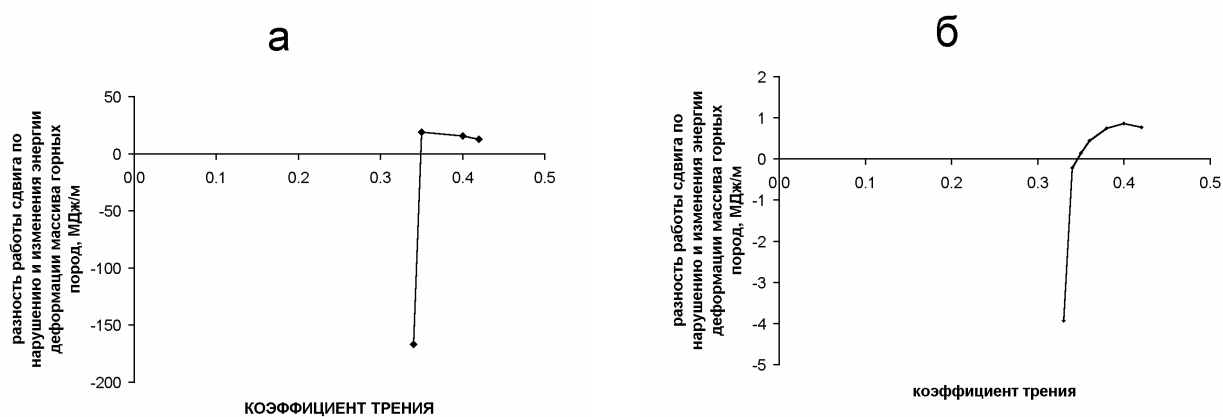


Рис.3. Разность работы сдвига по тектоническому нарушению и изменения энергии деформации массива горных пород при приближении горных работ со стороны лежачего (а) и висячего (б) бока.

Рассмотрим влияние соотношения предельной и остаточной сдвиговой прочности на формирование очага горного удара по тектоническому нарушению. При равенстве предельной и остаточной сдвиговой прочности любые незначительные изменения геометрических параметров выработанного пространства сопровождаются соответствующим изменением напряженного состояния массива горных пород и постепенным сдвигом берегов тектонического нарушения. В случае, когда предельная сдвиговая прочность значительно превышает остаточную, существует возможность постепенного накопления упругой энергии в массиве горных пород и возрастания касательных напряжений на поверхности ослабления при отработке залежи без подвижек по контакту до тех пор, пока на тектоническом нарушении не достигаются условия сдвига. Значительное снижение уровня касательных напряжений до величины остаточной сдвиговой прочности сопровождается резким уменьшением энергии деформации массива горных пород и приводит к динамическому сдвигу по тектоническому нарушению. Таким образом, необходимыми условиями горного удара по тектоническому нарушению, являются низкий коэффициент трения по поверхности ослабления и значительная разность предельной и остаточной сдвиговой прочности тектонического нарушения. Чем меньше величина коэффициента трения и выше соотношение предельной и остаточной сдвиговой прочности, тем большая энергия может выделиться в виде кинетической энергии волн при динамическом сдвиге по поверхности тектонического нарушения. Для оценки поведения массива горных пород было выполнено моделирование рассматриваемых процессов при коэффициенте трения, равном 0.25, и соотношении предельной и остаточной прочности, равном 1.9. Расстояние от границы

выработанного пространства до тектонического нарушения на горизонте ведения горных работ со стороны лежачего бока составляло 50 м. На рис.4 показаны величины сдвига берегов тектонического нарушения. Зона сдвига распространяется с поверхности до глубины около 1200 м. Максимальный сдвиг достигает величины 750 мм. Отметим, что оценка зоны сдвига на предварительной стадии составляла 6 м. Величина энергии, выделяемой при сдвиге по сбросу, в данном случае равна 1134 МДж/м.

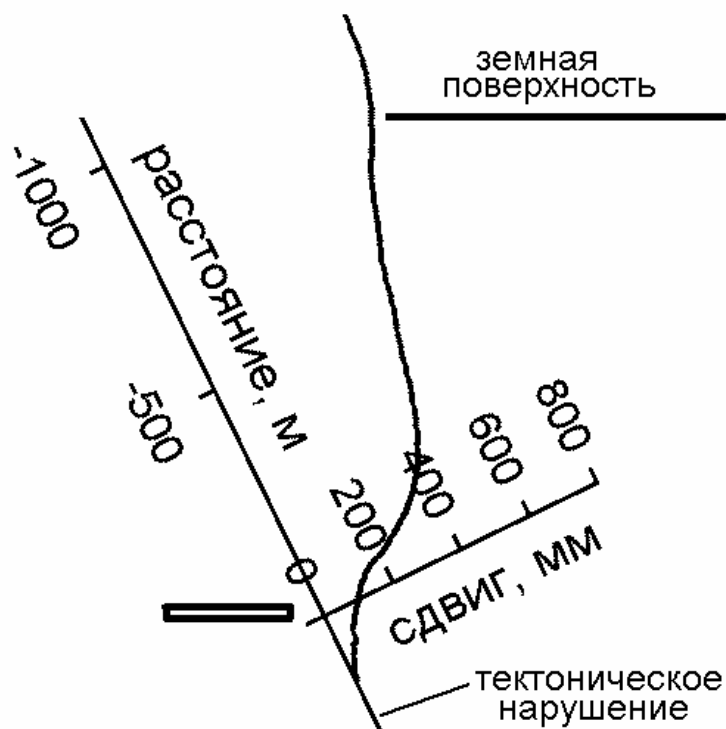


Рис.4. Сдвиг пород лежачего бока по тектоническому нарушению при значении коэффициента трения 0.25 и отношении предельной к остаточной прочности 1.9.

### Геомеханические рекомендации

Субвертикальное ( $60^{\circ}$ - $65^{\circ}$ ) крупное тектоническое нарушение (сброс) с амплитудой смещения до 70 м и шириной до 10 м разделяет Октябрьское месторождение вкрест простирания и является естественной границей полей рудников «Октябрьский» и «Таймырский». В результате выемки рудных запасов Октябрьского месторождения созданы заполненные твердеющей закладкой протяженные горизонтальные выработанные пространства длиной 800-1000 м, шириной 200-600 м и высотой около 25 м [5,6]. В работах [1,2,7] исследовалось напряженное состояние межшахтных целиков, разделяющих выработанные пространства. Установлено, что поведение массива вблизи тектонического нарушения является определяющим фактором в формировании геомеханических условий отработки залежи. 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. Горные работы на руднике «Октябрьский» приближаются к сбросу со стороны лежачего бока «под тектоническое нарушение». В настоящее время расстояние от фронта работ рудника «Октябрьский» до сброса на горизонте рудного тела около 100 м. С приближением очистных работ к тектоническому нарушению повышается вероятность динамических сдвигов по сбросу.

При приближении фронта горных к сбросу на расстояние около 50 м необходимо создание системы контроля за уровнем и характером сдвига по поверхности ослабления прежде всего в выработках вентиляционно-закладочного горизонта шахты №2 рудника «Октябрьский» в непосредственной близости от тектонического нарушения. Динамический сдвиг по сбросу даже с малым выделением энергии будет являться свидетельством того, что коэффициент трения менее критического значения. Дальнейшее приближение фронта работ к сбросу может привести к горному удару с выделением большого количества энергии. Основным фактором, снижающим коэффициент трения по поверхности ослабления, являются потоки воды по тектоническому нарушению, увеличивающиеся в период интенсивного таяния снегов на земной поверхности. В связи с некоторой вероятностью горного удара по тектоническому нарушению, возможны изменения в порядке ведения горных работ на руднике «Октябрьский», направленные на снижение интенсивности отработки рудных запасов в непосредственной близости от тектонического нарушения. Прежде всего потребуется снизить скорость приближения фронта работ к сбросу. Одним из возможных вариантов, снижающих вероятность динамических подвижек по тектоническому нарушению и их амплитуду, является последовательное (не одновременное по панелям) приближение фронта работ к сбросу.

## **Выводы**

1. Установлено, что одним из основных параметров, определяющих возможность динамического сдвига по нарушению, является коэффициент трения по поверхности ослабления. Для условий Октябрьского месторождения предельное значение коэффициента трения, отделяющего процесс устойчивого смещения от динамической подвижки по поверхности тектонического нарушения (сброса) равно 0.35.

2. Дополнительным фактором, увеличивающим уровень кинетической энергии волн при динамическом сдвиге по поверхности ослабления, является соотношение предельной и остаточной сдвиговой прочности тектонического нарушения.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

- 1. 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, 1991.
- 2. Болтенгаген И.Л., Федоренко В.К.** Исследование напряженного состояния разделительных массивов Октябрьского месторождения методом гидроразрыва скважин // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. – Новосибирск: ИГД СО РАН, 1999.
- 3. Болтенгаген И.Л.** Моделирование начальных напряжений и поверхностей ослабления методом конечных элементов // ФТПРПИ, №2, 1999.
- 4. Карташов Ю.М., Матвеев Б.В., Михеев Г.В., Фадеев А.Б.** Прочность и деформируемость горных пород. –М: Недра, 1979.
- 5. Ламзин А.Н., Аршавский В.В., Тапсиев А.П. и др.** Особенности отработки обширной залежи на руднике «Октябрьский» // ФТПРПИ, №2, 2002.
- 6. Айнбиндер И.И., Овчаренко В.В., Аршавский В.В.** Основные направления повышения безопасности разработки рудных месторождений на больших глубинах // Горный информационно-аналитический бюллетень. –М.: Московский государственный горный университет, №12, 2002.
- 7. Болтенгаген И.Л., Попов С.Н.** Геомеханический анализ разгруженных зон при защитной наработке рудной залежи // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. –Новосибирск: ИГД СО РАН, 2001.