

УДК 539.3+531.6

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ ГОРНЫХ УДАРОВ

Г. Л. Линдин, Т. В. Лобанова*

Новокузнецкий институт (филиал) Кемеровского государственного университета,

E-mail: lindins@ngs.ru, ул. Циолковского, 23, 654041, г. Новокузнецк, Россия

**Сибирский государственный индустриальный университет,*

E-mail: lobanova_tv@sibsiu.ru, ул. Кирова, 42, 654007, г. Новокузнецк, Россия

Исследовано напряженно-деформированное состояние упругой плоскости с круглой полостью при различных условиях нагружения. Построены линии тока энергии. Отмечено влияние участков концентрации сейсмособытий на конфигурацию линий тока. Предложено определение вероятности горного удара.

Горные удары на рудниках, распределения эпицентров сейсмособытий, линии тока энергии, вероятность горного удара

ВВЕДЕНИЕ

При ведении горных работ в высоконапряженных массивах скальных пород проявляется техногенная сейсмичность, вопросам прогноза и профилактики которой в последние годы уделяется много внимания во всех странах с развитой горнодобывающей промышленностью.

В работе [1] отмечено, что основные процессы горного производства есть не что иное, как передача энергии от одного участка массива к другому, например от взрывчатых веществ к горной породе. Типична также обратная ситуация, когда внутренняя энергия горного массива переходит в потенциальную энергию стоек, крепей и других ограждающих конструкций в горных выработках. Такое же направление передачи энергии имеет место и при горных ударах (ГУ), когда процесс передачи энергии происходит в динамической и неконтролируемой форме.

Энергетические источники ГУ рассматриваются авторами [2] в рамках концепции самоорганизованной критичности, согласно которой геологическая среда — открытая динамическая самоорганизующаяся система. В ней одновременно протекают два процесса: накопление упругой энергии деформирования за счет внутренних (технологических) и внешних (тектонических) источников, а также диссипация этой энергии путем неупругих сдвигов и той же техногенной сейсмичности. Крупные структурные блоки повышенной прочности в этой системе являются участками, в которых скорость накопления энергии опережает скорость ее диссипации. На границе этих энергонасыщенных участков, как правило, группируются ГУ. По времени они приурочены к массовым взрывам (МВ), которые выполняют роль “спускового крючка”.

Изучение направлений передачи энергии в рассмотренных процессах представляет большой интерес. На необходимость применения такого подхода указывалось уже в трудах ученых в 50-х годах XX в. [3, 4]. Позднее были введены линии тока энергии и вектор наибольшей

плотности тока энергии [5]. Этот вектор позволяет рассматривать процессы перераспределения напряжений и связанных с ними смещений как единое целое. В результате оказывается, что в деформируемом материале энергия течет подобно движению сжимаемой жидкости. При этом внутренняя энергия в любой фиксированный материальный объем течет только по вполне определенным линиям тока.

ЛИНИИ ТОКА ЭНЕРГИИ В ПЛОСКОСТИ

Рассматривается плоская деформация в декартовых координатах x_1, x_2 . Пусть известны напряжения и смещения. В каждой точке среды (x_1, x_2) с вектором смещений $\bar{u}(u_1, u_2)$ можно найти такую площадку с нормалью $\bar{n}(n_1, n_2)$ и вектором напряжений $\bar{\sigma}_n$, который ортогонален вектору смещений. Действительно, согласно формуле Коши

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_n \bar{u} &= (\sigma_{11}n_1 + \sigma_{12}n_2)u_1 + (\sigma_{12}n_1 + \sigma_{22}n_2)u_2 = \\ &= (\sigma_{11}u_1 + \sigma_{12}u_2)n_1 + (\sigma_{12}u_1 + \sigma_{22}u_2)n_2 = 0. \end{aligned}$$

Искомый вектор \bar{n} ортогонален вектору

$$\bar{E} = -(\sigma_{11}u_1 + \sigma_{12}u_2, \sigma_{12}u_1 + \sigma_{22}u_2), \tag{1}$$

касательному линии тока энергии (ЛТЭ), которая так называется потому, что напряжение $\bar{\sigma}_n$ на этой линии не совершает работы. Таким образом, через эту линию энергия не протекает. Вектор \bar{E} указывает направление тока энергии. Ситуация напоминает плоское течение жидкости вдоль линий тока. Действительно, рассмотрим теорему Клапейрона для упругого тела S (рис. 1а), ограниченного линией $l = l_1 + l_2 + l_3 + l_4$.

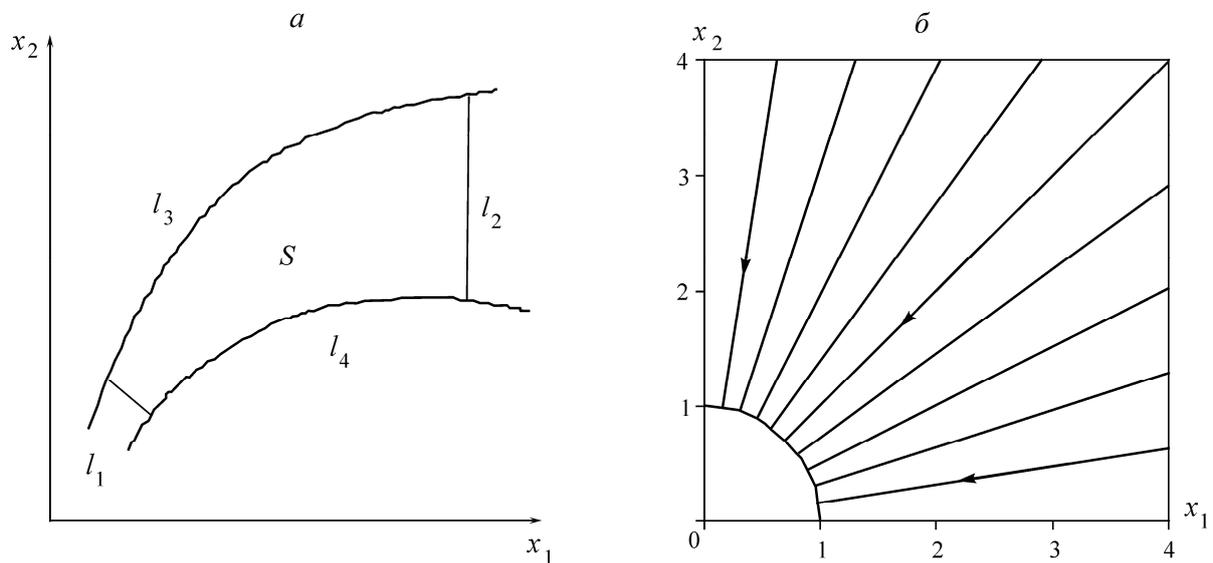


Рис. 1. Линии тока энергии в упругой среде

Работа внешних напряжений на границе l с внешней нормалью \bar{n} при отсутствии массовых сил равна внутренней энергии тела:

$$\oint_l \bar{\sigma}_n \bar{u} dl = \iint_S \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} dS.$$

Если l_3, l_4 — ЛТЭ, то поток энергии через участок границы l_1 равен потоку энергии через участок l_2 за вычетом внутренней энергии тела. Другими словами, через участок l_1 энергия поступает только по направлениям, ограниченными линиями l_3, l_4 .

Следует отметить, что в механике наряду с работой внешних напряжений на смещениях рассматривается работа напряжений на дополнительных смещениях, связанных с изменением граничных условий. В этом случае ЛТЭ указывают направление тока дополнительной энергии и определяются вектором \bar{E} (1), в котором используются дополнительные смещения. Аналогичные векторные поля Умова и Пойнтинга [4] рассматриваются в акустике и электродинамике.

Рассмотрим бесконечную упругую плоскость, сжимаемую на бесконечности главными напряжениями

$$\sigma_1^\infty = \frac{\nu p}{1-\nu}, \quad \sigma_2^\infty = p, \quad (2)$$

где ν — коэффициент Пуассона упругой среды, а p — отрицательное напряжение сжатия. Построим ЛТЭ в случае, когда плоскость ослаблена свободным отверстием радиуса $r = 1$:

$$\sigma_r = 0, \quad \tau_{r\theta} = 0 \quad \text{при } r = 1. \quad (3)$$

Напряжения в первой краевой задаче (2), (3) определяются методом комплексных потенциалов Колосова–Мусхелишвили [6], а смещения вычисляются с момента образования свободного отверстия в однородном поле напряжений (2). Поэтому они называются дополнительными смещениями.

Следует отметить, что дополнительные смещения соответствуют задаче, в которой на контуре отверстия заданы напряжения (2), но с противоположным знаком. Полученные таким образом напряжения и дополнительные смещения в полярной системе координат r, φ имеют вид

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \frac{p}{2(1-\nu)} \left[1 - (1-2\nu) \cos 2\varphi - \frac{r^2 - (4r^2 - 3)(1-2\nu) \cos 2\varphi}{r^4} \right], \\ \sigma_\varphi &= \frac{p}{2(1-\nu)} \left[1 + (1-2\nu) \cos 2\varphi + \frac{r^2 + 3(1-2\nu) \cos 2\varphi}{r^4} \right], \\ \tau_{r\varphi} &= p \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \frac{(r^2 - 1)(r^2 + 3)}{r^2} \sin 2\varphi, \\ u_r &= -\frac{p}{4\mu r(1-\nu)} \left[(1-2\nu) \frac{1 - 4(1-\nu)r^2}{r^2} \cos 2\varphi - 1 \right], \\ u_\varphi &= \frac{p(1-2\nu)}{4\mu r(1-\nu)} \frac{1 + 2(1-2\nu)r^2}{r^2} \sin 2\varphi, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\mu = 0.5E/(1+\nu)$ — модуль сдвига; E — модуль упругости материала. Если решение (4) подставить в (1), то векторное поле \bar{E} будет полностью определено. Задача определения ЛТЭ сводится к построению интегральных кривых дифференциального уравнения

$$\frac{dx_1}{dx_2} = \frac{\sigma_{11}u_1 + \tau_{12}u_2}{\sigma_{22}u_2 + \tau_{12}u_1}, \quad (5)$$

которые отыскиваются численно методом Эйлера.

В качестве примера рассмотрим частный случай ($\nu = 0.5$) плоскости, всесторонне сжатой на бесконечности отрицательным напряжением p . Согласно решению (4),

$$\sigma_r = p(1 - r^{-2}), \quad \sigma_\varphi = p(1 + r^{-2}), \quad u_r = p/(2\mu r), \quad \tau_{r\varphi} = u_\varphi = 0.$$

Дополнительные смещения, как было отмечено выше, соответствуют задаче, в которой на контуре отверстия задано растягивающее радиальное напряжение $\sigma_r = -p$, $\tau_{r\varphi} = 0$. Радиальные смещения направлены к центру круга.

Нулевые компоненты напряжений и смещений означают, что ЛТЭ направлены по радиусам (рис. 1б). Стрелками здесь и далее отмечены направления тока энергии. Рассмотрим кольцевой сектор S , ограниченный ЛТЭ l_3 , l_4 и дугами l_1 , l_2 радиуса r , R , которые стягивают центральный угол $\Delta\varphi$. Тогда, согласно рис. 1б, поток энергии через участок границы l_1 с нормалью, направленной от центра отверстия,

$$\int_{l_1} \bar{\sigma}_n \bar{u} dl = \frac{p^2 \Delta\varphi}{2\mu} (1 - r^{-2}) > 0$$

равен потоку энергии через участок l_2 с такой же нормалью

$$\int_{l_2} \bar{\sigma}_n \bar{u} dl = \frac{p^2 \Delta\varphi}{2\mu} (1 - R^{-2}) > 0$$

за вычетом внутренней дополнительной энергии $\iint_S \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} dS = \frac{p^2 \Delta\varphi}{2\mu} (r^{-2} - R^{-2}) > 0$. Таким образом, поток энергии, вызванный свободным отверстием, переносит энергию из внешней среды к отверстию.

Следует отметить, что внутренняя дополнительная энергия равна дивергенции векторного поля \bar{E} с противоположным знаком и может быть как положительной, так и отрицательной. Это связано с тем, что дополнительные деформации ε_{ij} не связаны с напряжениями σ_{ij} законом Гука. В рассмотренном примере компоненты $\varepsilon_r > 0$, а $\sigma_r < 0$, поэтому течение энергии напоминает течение сжимаемой жидкости, а вектор \bar{E} — скорость течения жидкости.

Нетрудно показать, что при отсутствии отверстия в плоскости ЛТЭ представляют собой семейство прямых $x_1 = \text{const}$. Действительно, в однородном решении задачи (2) $\varepsilon_1 = u_1 = \tau_{12} = 0$, т. е. вертикальные площадки являются жесткими стенками без трения, а плоскость играет роль посредника в передаче внешней энергии между горизонтальными площадками.

В случае неравномерного сжатия плоскости картина меняется. На рис. 2 показаны ЛТЭ в случае, когда напряжения на бесконечности связаны условием $\sigma_1^\infty = \sigma_2^\infty / 2$. Этот случай получается согласно условиям (2) при $\nu = 1/3$.

Свободное отверстие является ЛТЭ; оно обтекается соседними ЛТЭ, которые сближаются друг с другом; в результате вдоль оси x_1 образуются зоны концентрации энергии плоскости. Другими словами, свободное отверстие аккумулирует энергию набегающего потока в зонах, расположенных по бокам отверстия. Подобная картина отмечается в случае произвольного эллиптического отверстия в плоскости при одноосном сжатии на бесконечности [1].

Следует отметить, что при $\sigma_1^\infty = \sigma_2^\infty / \kappa$, где $\kappa > 2$ ($\nu < 1/3$), ЛТЭ стремятся к оси x_1 как к горизонтальной асимптоте. Это связано с изменением знака смещения u_1 вблизи этой оси в решении (4).

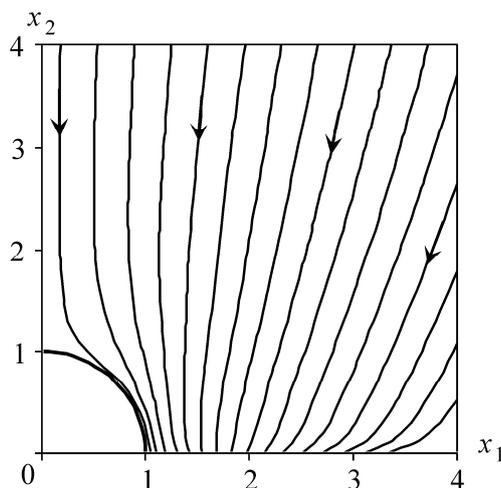


Рис. 2. ЛТЭ в нагруженной плоскости, ослабленной свободным отверстием

Пусть бесконечная упругая плоскость сжимается на бесконечности главными напряжениями (2) при $\nu = 1/3$. Рассмотрим теперь ЛТЭ в случае, когда плоскость усилена единичным кругом, на границе которого зададим равномерное нормальное давление $q < 0$:

$$\sigma_r = q, \quad \tau_{r\varphi} = 0 \quad \text{при } r = 1. \quad (6)$$

Аналитическое решение задачи (2), (6), согласно принципу суперпозиции, получается путем сложения решения (4) с решением задачи (6), которое имеет вид

$$\sigma_r = -\sigma_\varphi = \frac{q}{r^2}, \quad \tau_{r\varphi} = 0, \quad u_r = -\frac{q}{2\mu r}, \quad u_\varphi = 0. \quad (7)$$

Подчеркнем, что дополнительные смещения соответствуют задаче, в которой круг заполнен расширяющейся средой, например вследствие трещинообразования и дилатансии. В этом случае радиальные смещения направлены от центра круга.

Решение задачи (2), (6) в декартовых координатах имеет вид

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= \frac{p}{2(1-\nu)} \left[2\nu - \frac{(4\nu-1)\cos 2\varphi}{r^2} - \frac{(1-2\nu)(3-2r^2)\cos 4\varphi}{r^4} \right] + \frac{q \cos 2\varphi}{r^2}, \\ \sigma_{22} &= \frac{p}{2(1-\nu)} \left[2(1-\nu) + \frac{(3-4\nu)\cos 2\varphi}{r^2} + \frac{(1-2\nu)(3-2r^2)\cos 4\varphi}{r^4} \right] - \frac{q \cos 2\varphi}{r^2}, \\ \sigma_{12} &= \frac{p}{2(1-\nu)} \left[-\frac{\sin 2\varphi}{r^2} - \frac{(1-2\nu)(3-2r^2)\sin 4\varphi}{r^4} \right] + \frac{q \sin 2\varphi}{r^2}, \\ u_x &= \frac{p}{4\mu(1-\nu)} \left[\frac{\cos \varphi}{r} - (1-2\nu) \left(\frac{3-4\nu}{r} \cos \varphi + \frac{\cos \varphi}{r^3} + \frac{\cos 3\varphi}{r} \right) \right] - \frac{q \cos \varphi}{2\mu r}, \\ u_y &= \frac{p}{4\mu(1-\nu)} \left[\frac{\sin \varphi}{r} + (1-2\nu) \left(\frac{3-4\nu}{r} \sin \varphi + \frac{\sin \varphi}{r^3} - \frac{\sin 3\varphi}{r} \right) \right] - \frac{q \sin \varphi}{2\mu r}. \end{aligned} \quad (8)$$

Рассмотрим поток энергии A , вытекающий наружу через контур единичной окружности l_1 . Согласно решению (8), поток возрастает с ростом напряжения q :

$$A = - \int_{l_1} \overline{\sigma_n u} dl = q \int_0^{2\pi} u_r(1, \varphi) d\varphi = \frac{\pi p^2}{\mu} \left(\frac{q^2}{p^2} - \frac{3q}{4p} \right).$$

На рис. 3 построена зависимость безразмерного потока $A\mu/\pi p^2$ от отношения напряжений q/p , согласно которой поток возрастает при $q/p > 0.375$ и положителен при $q/p > 0.75$.

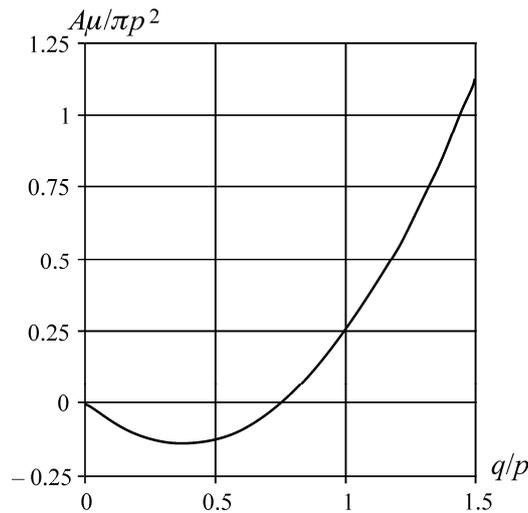


Рис. 3. Поток энергии, вытекающий из круга

Рассмотрим ЛТЭ для решения задачи (2), (6) при $\nu = 1/3$. На рис. 4 сплошными и пунктирными линиями представлены ЛТЭ в случаях $q = p$ и $q = p/2$ соответственно.

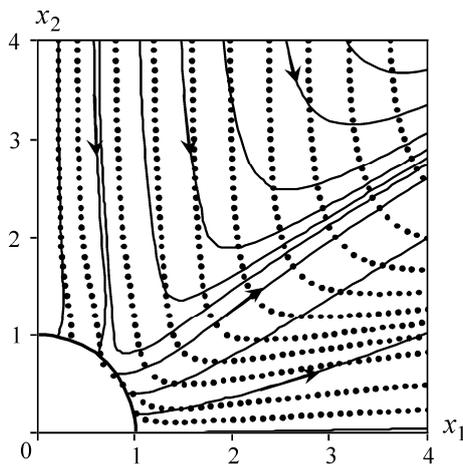


Рис. 4. ЛТЭ около круга, заполненного расширяющейся средой

Можно выделить следующие потоки: вдоль оси x_2 поток энергии из окружающей среды втекает в круг; вдоль оси x_1 поток вытекает из круга, унося с собой энергию в окружающую среду; между ними набегающий поток из внешней среды разворачивается около круга и возвращается во внешнюю среду. При этом возникает огибающая семейства линий тока, разде-

ляющая потоки из круга и внешней среды: если при $q = p/2$ огибающая составляет с осью x_1 примерно 12° , то при $q = p$ уже около 35° .

Таким образом, круг с расширяющейся средой формирует энергетическую струю в направлении огибающих ЛТЭ. Полученный результат согласуется с данными [5], где рассмотрен аналогичный эффект отпора крепи выработки.

Авторами получено аналитическое решение задачи (2), (6) для эллипса любой формы, однако вследствие громоздкости оно здесь не приводится. В случае $b < a$ рассмотренный эффект становится более чувствительным к отношению напряжений q/p . Рассмотрим, например, ЛТЭ около эллипса с полуосями $a=1$, $b=0.4$. На рис. 5а представлены линии тока при $q = 0.8p$, согласно которым энергия втекает в заданный эллипс. В случае $q = 0.85p$ (рис. 5б) набегающий поток вытесняется к вершине эллипса, а в случае $q = 0.89p$ (рис. 5в) формируется энергетическая струя подобно рис. 4. При $q \geq 0.9p$ ЛТЭ напоминают случай $p = 0$ [1], когда отсутствуют напряжения на бесконечности.

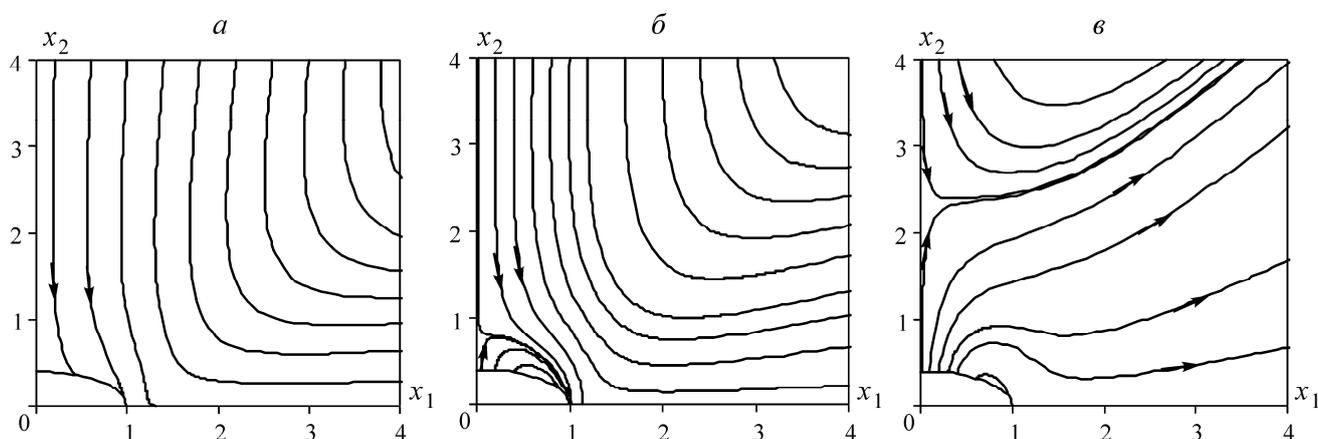


Рис. 5. ЛТЭ около эллипса с полуосями $b/a = 0.4$ в случаях $q = 0.8p$ (а); $q = 0.85p$ (б); $q = 0.89p$ (в)

Роль области с расширяющейся средой в горном массиве играют участки концентрации эпицентров сейсмособытий (УКЭС) [7], которые регистрируются сейсмостанциями и по которым может изучаться сейсмическая активность массива. Повышенная сейсмоактивность сопровождается процесс трещинообразования и дилатансии массива. Согласно рис. 4, эти участки играют роль “стрелочника”, формируя дополнительный энергетический поток в участки концентрации тектонической энергии.

Если на пути этого потока окажутся структурные блоки, проявляемые “затишьем” сейсмособытий и способные аккумулировать потенциальную энергию, то возникает участок концентрации потенциальной энергии и высокой удароопасности массива. Например, на Восточном участке Таштагольского железорудного месторождения при разработке блока 13 в 1999 г. на этаже $(-280) \div (-210)$ м сейсмическая энергия ГУ достигла $2.3 \cdot 10^9$ Дж, а оценка минимального объема структурного блока составила $(3.4 \div 13.6) \cdot 10^6 \text{ м}^3$ [8].

Этот же структурный блок проявился в 2012 г. при разработке блока 13 на следующем этаже $(-350) \div (-280)$ м. В данном случае “затишье” сейсмической активности наблюдалось на фоне 1400 сейсмособытий в 500-метровой окрестности блока 13, массовый взрыв (МВ) которого был запланирован на ноябрь 2012 г. Однако уже первый технологический взрыв (ТВ) блока привел к обрушению выработок.

ВЕРОЯТНОСТЬ ГОРНОГО УДАРА

Рассмотрим распределение сейсмособытий в период отработки блока 18. В 2006 г. на Восточном участке обрабатывались три очистных блока (светлые квадраты на рис. 6): в период 02.04.06 – 28.05.06 произведено 9 ТВ и 18.06.06 — МВ 247 т ВВ блока 9 в северной части участка; в период 17.09.06 – 12.11.06 произведено 7 ТВ блока 26 в южной части; в период 30.07.06 – 01.10.06 произведено 6 ТВ и 19.11.06 — МВ 167.8 т ВВ блока 18 в центральной части. Точками отмечены сейсмособытия, обнаруженные в 500-метровой окрестности блока 18 на момент его МВ. Наблюдаются УКЭС в окрестности рассматриваемых блоков: наиболее плотный отмечен кругом около блока 9 (623 события в 100-метровой окрестности), а около блока 26 — 240 событий.

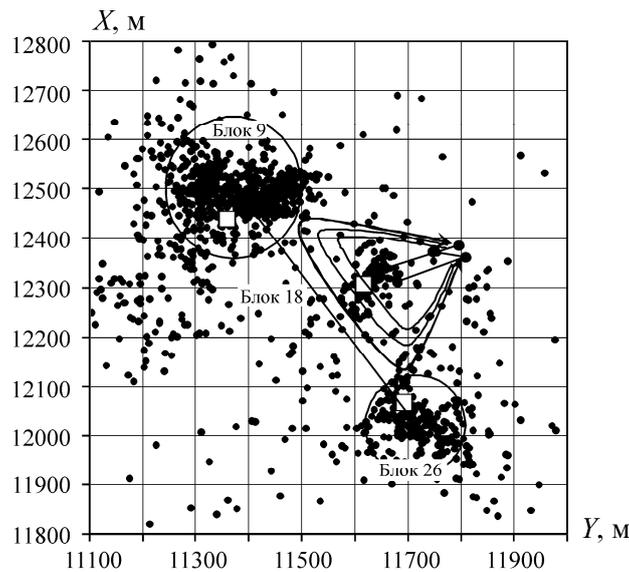


Рис. 6. Распределение сейсмособытий и ЛТЭ при отработке блока 18

Максимальное тектоническое напряжение на бесконечности направлено по простиранию рудного тела с СЗ на ЮВ (ось X направлена на север) и превышает гравитационное напряжение примерно в 2.5 раза. Напряжение вкрест простирания выражается согласно условию (2). Общее количество сейсмособытий $N = 1080$, отмеченных в 500-метровой окрестности блока 18 и связанных с отработкой блоков 9, 18, 26, свидетельствует об интенсивном потоке дополнительной энергии из УКЭС в структурные блоки. На момент МВ в серии ТВ блока 18 в обрабатываемом этаже и ниже зарегистрировано всего $n = 71$ сейсмособытие. Кривыми отмечены ЛТЭ, согласно рис. 4, от УКЭС к структурным блокам, на границе которых произошли пять микроударов (МУ) (кружки, соединенные ломаной в хронологической последовательности), три из которых произошли уже на стадии ТВ (30.07.06, 25.08.06, 03.09.06) и два — сразу после МВ блока. Другими словами, структурные блоки оказались местом пересечения интенсивных энергетических потоков, набегающих из двух плотных УКЭС.

С учетом приведенных данных предлагается определение вероятности ГУ

$$P = (N - n) / N, \quad (9)$$

где n — количество сейсмособытий, зарегистрированных в 100-метровой окрестности рассматриваемого блока во время его ТВ в обрабатываемом этаже и ниже, а N — в 500-метровой окрестности

стности блока до момента его МВ, начиная с подготовки блоков, отработанных до или совместно с этим блоком на одном участке.

В случае блока 18, согласно рис. 6, вероятность ГУ $P = 0.93$. Отметим, что за последние 14 лет наблюдений на Таштагольском руднике ГУ происходили при разработке всего четырех блоков. Во всех этих случаях наблюдались плотные УКЭС с общим количеством сейсмособытий $N = 563 \div 1080$, а очаги ГУ находились в зоне относительного “затишья” сейсмособытий $n = 38 \div 71$ [8]. Причем в каждом таком случае вероятность ГУ $P > 0.9$, а во всех остальных 22 случаях, когда не было ГУ, $P < 0.9$. Подобная роль УКЭС отмечается и на других рудниках [7].

ВЫВОДЫ

Энергетическими источниками горных ударов являются участки концентрации эпицентров сейсмособытий и структурные блоки, способные аккумулировать энергию тектонического потока, доминирующего в массиве горных пород. Чем плотнее эти участки, тем большая часть поступающего энергетического потока аккумулируется в структурных блоках.

Совместная отработка нескольких технологических блоков на одном участке месторождения значительно повышает удароопасность для того блока, который оказался рядом со структурным, и снижает — рядом с участком концентрации эпицентров сейсмособытий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ревуженко А. Ф., Клишин С. В. Линии тока энергии в деформируемом горном массиве, ослабленном эллиптическими отверстиями // ФТПРПИ. — 2009. — № 3.
2. Козырев А. А., Савченко С. Н., Панин В. И., Мальцев В. А. Особенности прогноза и профилактики мощных динамических явлений в природно-технических системах // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2001.
3. Умов Н. А. Избранные сочинения. — М.; Л.: Гостехиздат, 1950.
4. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. — М.: Физматгиз, 1959.
5. Крамаренко В. И., Ревуженко А. Ф. Потoki энергии в деформируемой среде // ФТПРПИ. — 1988. — № 6.
6. Седов Л. И. Механика сплошной среды. — М.: Наука, 1970. — Т. 2.
7. Пономарев В. С., Турунтаев С. Б., Воинов А. К., Кресков А. С., Логунов В. А. Исследование режима возбужденной сейсмичности на шахтах СУБРa // ФТПРПИ. — 1992. — № 4.
8. Линдин Г. Л., Лобанова Т. В. Особенности сейсмоактивности Таштагольского месторождения перед горными ударами // ФТПРПИ. — 2012. — № 2.

Поступила в редакцию 5/IX 2012