УДК 550.343.6 + 622.831.32

ТЕХНОГЕННЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ И ПРОГНОЗ ОБРУШЕНИЙ НА ЖЕЗКАЗГАНСКОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ

Герман В.И.

ГПМК «Красноярский научно-исследовательский институт геологии и минерального сырья» (ГПМК «КНИИГиМС»), 660049, Красноярск, пр. Мира, 55, e-mail: german3v@yandex.ru

Рассмотрен опыт прогноза обрушений на Жезказганском медном месторождении и приведены данные о техногенных землетрясениях, индуцированных горными работами на нем. Показано, что эффективным средством контроля за текущим состоянием выработок является сейсмический мониторинг. Совместный анализ пространственно-временного и энергетического распределения регистрируемых сейсмических событий с применением современных физических представлений о процессе разрушения горных работ позволяет прогнозировать обрушения.

Ключевые слова: прогноз обрушений, техногенные землетрясения, параметр сближения сейсмических событий

EARTHQUAKE CAUSED BY MINING AND COLLAPSES FORECASTING ON ZHEZKAZGAN COPPER DEPOSIT

Victor I. German

Krasnoyarsk Research Institute of Geology and Minerals, 660049, Russia, Krasnoyarsk, Mira av., 55, e-mail: german3v@yandex.ru

The experience of the collapses forecasting on the Zhezkazgan copper deposit is considering. Information about man-made earthquakes induced by mining on the deposit is given. It is shown that seismic monitoring is an effective tool to control the current state of excavations. Analysis of the space-time and the energy distribution of recorded seismic events based on modern physical concepts to the process of rock failure allows to forecast collapses.

Keywords: collapses forecasting, man-made earthquakes, parameter of seismic events convergence

Введение

Жезказганское медное месторождение расположено в юго-западной части Центрального Казахстана и известно со времен Геродота. Активное его освоение началось в 50-х годах XX века. Подземные выработки месторождения занимают участок 10x10 км и уходят на глубину до 650 м. Месторождение преимущественно отрабатывалось камерно-столбовой системой.

Техногенные землетрясения на Жезказганском месторождении

Ведение горных работ на Жезказганском месторождении (ЖМ) индуцировало возникновение мощных техногенных землетрясений. Сильнейшее из них произошло 1 августа 1994 года и имело магнитуду $M_S = 4.6$, $m_b = 4.8$ (по данным ГС РАН). Оно сопровождалось обрушением панелей по залежи Златоуст-2-IV-V на площади 480 тыс.м² (900x680 м). Объем обрушившихся пород - 144 млн. м³, вес - 375 млн. т.

Через два года 23 июня 1996 г. обрушились выработанные пространства на шх. 42-47. На поверхности ушло в провал здание дробилки ОТК, в шахте погибло 6 человек. Данное обрушение сопровождалось сейсмическим событием с магнитудой $m_b = 3.7$ (по данным NEIC и ISC).

После указанного события началось создание системы сейсмического мониторинга Жезказганского месторождения, которая начала работать в 1997 году и позволила контролировать сейсмичность в местах ведения горных работ. Начиная с этого времени, частота и сила мощных техногенных землетрясений стала уменьшаться.

С 1997 г. произошло два сильных землетрясения. 10.09.2002 в районе шахты 57бис произошло обрушение на площади 116 480 тыс.м². Оно сопровождалось сейсмическим событием с $M_S = 3.8$ (ISC), $m_b = 4.5$ (ГС РАН). 24.06.2005 на шх. 45 обрушились выработанные пространства штреков 1-8 по залежи ПЮЗ-9-1 на площади 152 тыс.м². В шахте от воздушного удара погибло

3 человека. Сейсмические сети зарегистрировали его как землетрясение с $M_S = 3.5$ (ISC), $m_b = 4.2$ (ГС РАН).

Событие 2005 г. привело к реорганизации геомеханических служб, контролирующих состояние выработок месторождения. В 2007 г. на нем была установлена система сейсмического мониторинга компании ISS International (ныне Institute of Mine Seismology, Австралия). В это же время в практику прогноза обрушений на месторождении была внедрена методика, основанная на отслеживании параметра сближения сейсмических событий. Примеры прогноза обрушений по данной методике в реальном режиме времени приведены в статьях [2, 4, 7].

Физические принципы прогноза обрушений на примере Жезказганского медного месторождения

В связи со скоротечностью обрушений на ЖМ особое значение приобретает анализ пространственного и энергетического/масштабного распределений зарегистрированных событий, а также их изменения со временем. Применение концентрационного критерия разрушения твердых тел [5, 6, 10] позволяет проводить такой анализ.

В настоящее время основным методом выделения опасных зон на основе данных сейсмического мониторинга на рудниках ЖМ является модифицированный

концентрационный критерий разрушения твердых тел [1 – 4]. При этом для оценки концентрации дефектов использовался не концентрационный параметр k , а параметр сближения сейсмических событий, который рассчитывается для каждой пары сейсмических событий с индексами i и j без применения процедуры осреднения, он характеризует возможность взаимодействия событий с индексами i и j :

$$K_{ij} = \frac{d_{ij}}{(L_i + L_j)/2},$$

где – расстояние между гипоцентрами/эпицентрами событиями, а L_i и L_j размеры соответствующих им дефектов.

Условие возникновения опасной ситуации можно записать в виде

$$K_{ij} = \frac{d_{ij}}{(L_i + L_j)/2} < K_* \text{ или } d_{ij} < (K_* L_i + K_* L_j)/2$$

В рамках данного подхода взаимодействие двух дефектов возможно, если пересекаются области их влияния, имеющие радиус $K_* L_i/2$. Чем крупнее дефект соответствующий событию, тем больше размер этой зоны. Цепочки из данных зон образуют опасные области, где можно ожидать возникновения обрушения (см. Рис. 1).

Рис. 1. Цепочки из зон влияния событий, образующие потенциально опасные области слева – на плоскости (если нет данных о глубине), справа – в пространстве

Данная модификация концентрационного критерия разрушения твердых тел хорошо согласуется с представлениями механики разрушения. Типичной формулой для напряжений вокруг трещины размером L , на расстоянии r является:

$$\sigma = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_{\theta}(\theta)$$

[9, с. 79], где $f_{\theta}(\theta)$ – функция распределения напряжений по угловой координате, а коэффициент интенсивности K обычно представляется в виде

$K = \sigma_e \sqrt{\pi L Y}$, где Y – «К - тарировка», – внешнее напряжение, действующее на трещину [9, с. 102; 11], тогда выражение для напряжений приобретает вид:

$$\sigma = \sqrt{\frac{L}{r} \frac{\sigma_e Y f_{\theta}(\theta)}{\sqrt{2}}}$$

откуда

$$r = \frac{(\sigma_e Y f_{\theta}(\theta))^2}{2\sigma^2} L = k'(\sigma, \theta, \sigma_e) L/2$$

Таким образом, если в последнем выражении пренебречь зависимостью от угловой координаты (заменить $(f_{\theta}(\theta))$ на константу – ориентация дефектов в массиве горных пород, как правило, не известна), то получится, что радиус опасной зоны вокруг трещины – зоны повышенных напряжений задается таким же образом как радиус зоны влияния события в модифицированном концентрационном критерии, т.е. критическому значению концентрационного параметра можно поставить в соответствие критическое значение напряжения (критерии разрушения с критическими напряжениями также имеют широкое распространение в инженерной практике). Большие значения напряжений соответствуют малым значениям параметра сближения событий. Интересным результатом также является то, что в соответствии с выражением для k' критическое значение параметра сближения событий / концентрационного параметра будет возрастать при увеличении действующих в массиве напряжений.

При оценке сейсмической опасности на ЖМ цепочки зон вокруг событий с радиусом $k_* L/2$ рассматриваются как наиболее опасные. Для условий ЖМ было установлено, что области, выделенные для $k_*=8$ относятся к потенциально опасным, а для $k_*=5$ – к критическим (неустойчивым) или уже обрушенным. Таким образом, для массива ЖМ, представленного перемежающимися слоями серых песчаников и красноцветных пород (алевролитов, аргиллитов) значение

параметра сближения, при котором происходят обрушения подработанной толщи пород с линейными размерами в десятки и сотни метров, равно $k_* \approx 5 \dots 8$

Заключение

Рассмотренный опыт прогноза обрушений на Жезказганском медном месторождении показывает, что эффективным средством контроля за текущим состоянием выработок является сейсмический мониторинг. Совместный анализ пространственно-временного и энергетического распределения регистрируемых сейсмических событий с применением современных физических представлений о процессе разрушения горных работ позволяет прогнозировать обрушения.

С сентября 2007 г. на Жезказганском месторождении в качестве основного критерия возникновения опасной ситуации был внедрен модифицированный концентрационный критерий разрушения твердых тел. Начиная с этого времени, были спрогнозированы все основные обрушения. Первый прогноз опасности возникновения делается, как правило, за месяц до реализации обрушения.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-05-00158 А и 14-45-04157 р_сибирь_а).

Список литературы

1. Герман В.И. Разработка формализованной методики выделения микросейсмических данных, соответствующих подготовке горных ударов. // Физические основы прогнозирования разрушения горных пород: Материалы I-й Международной школы-семинара (9–15 сентября 2001, г. Красноярск). – Красноярск: СибГАУ, 2002. – С. 98–104.
2. Герман В.И. Прогноз обрушений на рудниках по данным сейсмического мониторинга // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2014. – № 2. – С. 99–109.
3. Герман В.И., Мансуров В.А. Мониторинг индуцированной сейсмичности и процедура выделения очагов горных ударов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2002. – № 4. – С. 28–37.
4. Герман В.И., Мансуров В.А. Прогноз обрушений на Жезказганском медном месторождении. // ГИАБ. – 2010. – № 1. – С. 95–104.

5. Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А., Савельев В.Н., Султанов У.С. Концентрационный критерий объемного разрушения твердых тел // Физические процессы в очагах землетрясений / Под ред. М.А. Садовского, В.И. Мячкина. – М.: Наука, 1980. – С. 78–86.
6. Маловичко А.А., Завьялов А.Д., Козырев А.А. В кн. Природные опасности России. Т.1. Сейсмические опасности. – М.: Крук, 2000. – С. 243–293.
7. Мансуров В.А., Герман В.И. Прогноз обрушений на жезказганском месторождении по данным сейсмического мониторинга // Горный журнал. – 2007. – № 1. – С. 89-92.
8. Моги К. Предсказание землетрясений: Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 382 с.
9. Партон В.З. Механика разрушения: от теории к практике. – М.: Наука. 1990. – 240 с.
10. Рассказов И.Ю. Контроль и управление горным давлением на рудниках Дальневосточного региона. – М.: Горная книга, 2008. – 329 с.
11. Das S., Scholz C.H. Theory of Time-Dependent Rupture in the Earth. // J. Geophys. Res. – 1981. – V. 86. – P. 6039-6051.