

УДК 550.343.6 + 622.831.32

**ПРОГНОЗ ОБРУШЕНИЙ НА РУДНИКАХ  
ПО ДАННЫМ СЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА**

**В. И. Герман**

*ГПНК "Красноярский научно-исследовательский институт геологии и минерального сырья",  
E-mail: germanv@rambler.ru, просп. Мира, 55, 660049, г. Красноярск, Россия*

Рассматривается физический смысл характеристик сейсмичности, наиболее часто используемых для оценки опасности развития обрушений на рудниках. Описывается и обосновывается на основе механики разрушения модифицированный концентрационный критерий разрушения твердых тел, который успешно применяется для прогноза обрушений на Жезказганском медном месторождении.

*Прогноз обрушений, сейсмический мониторинг, концентрационный критерий разрушения, параметр сближения сейсмических событий*

Негативные формы проявления горного давления (обрушения, горные удары, потеря выработками устойчивости, процессы сдвижения породных массивов и т. д.) существуют на большинстве рудников. Для рудников, где накоплен большой объем непогашенных пустот, главной проблемой являются обрушения. Они могут приводить к повреждениям поверхностной инженерной инфраструктуры (здания, водопроводы, теплотрассы, линии электропередач, дороги и т. д.), разрушению горных выработок, включая действующие транспортные штреки, возникновению ударных волн в выработках, представляющих высокую опасность для горняков. Во время развития обрушения могут ощущаться интенсивные колебания почвы. Примером места, где наблюдаются все перечисленные явления, служит Жезказганское медное месторождение (Казахстан).

В последние десятилетия для прогноза и минимизации ущерба, причиняемого обрушениями и горными ударами, все шире применяют метод сейсмического мониторинга. Он основан на том, что при возникновении новых разрушений излучаются упругие волны. Их регистрация в режиме, близком к реальному времени, дает возможность получать информацию о месте и времени возникновения разрушений / сейсмических событий, а также оценивать их масштаб и ряд других характеристик. При этом важно не только оперативно и качественно обработать регистрируемую информацию, но и провести детальный анализ результатов мониторинга. Такой анализ позволяет оценить текущее состояние горного массива, спрогнозировать его поведение в будущем, обеспечить безопасные условия отработки рудных залежей путем принятия правильных и своевременных решений по управлению горным давлением.

Большинство работ по анализу индуцированной горными работами сейсмичности направлено на решение проблемы прогноза и предотвращения горных ударов [1–7] и лишь небольшое их число посвящено прогнозу внезапных обрушений, подготовка которых имеет ряд особенностей. Главная из них — быстрое формирование обрушения на последней стадии (подобно ускоренной стадии ползучести) и малое число сейсмических событий, предваряющих его. Такая особенность существенно ограничивает возможности статистического анализа данных сейсмического мониторинга с целью прогноза обрушений. Таким образом, нужен альтернативный подход, базирующийся на результатах механики разрушения.

Для прогноза обрушений необходим формализованный критерий формирования опасной ситуации, объединяющий в виде одной комплексной характеристики всю информацию, которую дает сейсмический мониторинг. Наиболее популярными характеристиками сейсмичности при прогнозе возникновения динамических форм горного давления являются сейсмическая активность и концентрационный параметр. В то же время каждая из этих характеристик не полностью использует даже основные параметры сейсмических событий: их координаты, время возникновения, масштаб.

#### ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ПРОЦЕССЕ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

Для анализа характеристик сейсмичности при прогнозе крупных обрушений на рудниках необходимо рассмотреть имеющиеся представления о процессе подготовки таких явлений.

В качестве базовой модели разрушения горных пород предлагается использовать многостадийную модель разрушения твердых тел [8–10], получившую широкое распространение. Она основана на кинетической концепции прочности [11] и концентрационном критерии разрушения, экспериментально подтвержденном на таких материалах, как горные породы, полимеры, металлы, композиты и др. [12–14]. Анализ других моделей подготовки крупных разрушений в геосреде приведен в [15, 16].

**Многостадийная модель разрушения твердых тел.** В соответствии с многостадийной моделью разрушения каждое разрушение (дефект / трещина  $J$  ранга / масштаба) готовится более мелкими дефектами  $J - 1$  ранга (рис. 1). На первом этапе идет случайное квазиравномерное накопление разрушений  $J - 1$  ранга. Затем вследствие неоднородности среды и локальных перегрузок формируются области, где концентрация разрушений становится высокой. В них создаются условия для взаимодействия и объединения дефектов. На заключительном этапе, когда концентрация дефектов  $J - 1$  ранга в такой области достигает критического порогового уровня, в ней образуется разрушение  $J$  ранга. Далее аналогичным образом из дефектов  $J$  ранга формируются разрушения  $J + 1$  ранга и т. д.

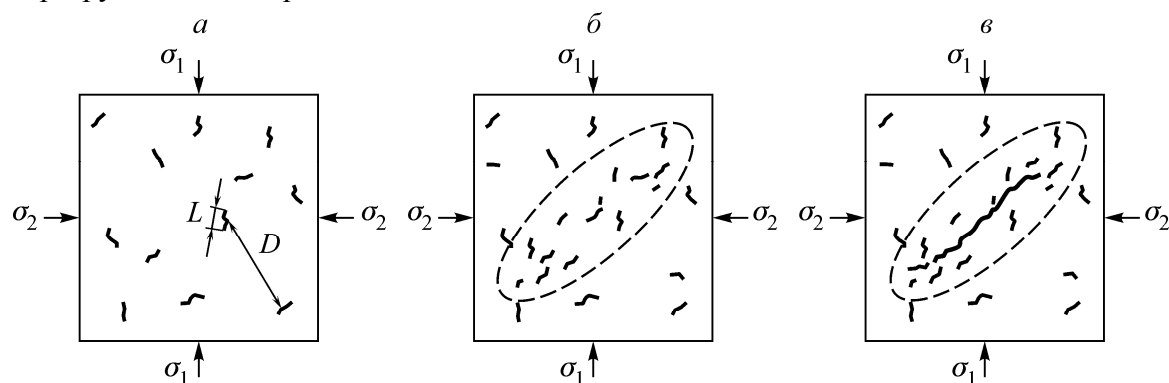


Рис. 1. Схема многостадийной модели разрушения твердых тел:  $a$  — некоррелированное накопление дефектов / трещин  $J - 1$  ранга;  $б$  — концентрация дефектов  $J - 1$  ранга;  $в$  — образование дефекта следующего  $J$  ранга

Лабораторные эксперименты на различных материалах позволили установить концентрационный критерий разрушения твердых тел [12], определяющий условия возникновения дефекта следующего масштабного уровня/ранга. Он возникает при условии, если безразмерная величина — концентрационный параметр

$$k = \frac{D_{av}}{L_{av}} = \frac{(V/N)^{1/3}}{\sum L_i / N},$$

являющийся отношением оценки среднего расстояния между дефектами  $D_{av}$  к их среднему размеру  $L_{av}$  ( $V$  — рассматриваемый объем, содержащий  $N$  трещин размером  $L_i$ ), примет значение меньше критической пороговой величины  $k_*$ . Теоретическое значение  $k_* \approx 3$  [12], но в реальных условиях для разрушений в массиве горных пород  $k_* \approx 5 - 10$  [9, 13, 17].

Описанная многостадийная модель разрушения твердых тел в своих основных положениях является схожей с популярной в сейсмологии моделью лавинообразного накопления трещиноватости [18], разработанной в Институте физики Земли РАН.

Важнейшими выводами из рассмотрения многостадийной модели разрушения твердых тел представляются следующие:

- каждый дефект готовится накоплением более мелких дефектов;
- существует единый физический механизм развития разрушения, работающий на различных масштабных уровнях.

Отмеченные особенности многостадийной модели свидетельствуют о том, что имеется принципиальная возможность прогноза возникновения крупных разрушений, и разрушение массивов горных пород на разных масштабных уровнях является самоподобным. В свою очередь самоподобие разрушения позволяет использовать результаты, полученные в сейсмологии, лабораторных испытаниях, а также прогнозировать свойства сильной сейсмичности, изучая закономерности возникновения слабых сейсмических событий, информации о которых значительно больше.

Возможным дальнейшим развитием представлений концентрационного критерия разрушения является более детальный учет распределения дефектов в пространстве и влияния их размеров на опасность возникновения крупного обрушения. При таком подходе удастся уйти от осреднения размеров отдельных дефектов и от оценки расстояний между дефектами, основанной только на их числе в рассматриваемом объеме.

**Применение концентрационного критерия разрушения к анализу каталогов сейсмических событий.** Сейсмический мониторинг на рудниках позволяет получать информацию о накоплении дефектов, параметры которых рассматриваются в концентрационном критерии разрушения твердых тел. Получаемые каталоги сейсмических событий содержат сведения о координатах и времени их возникновения, а также об их силе (магнитуде или энергетическом классе). Для оценки размера разрыва можно использовать широко применяемые в сейсмологии соотношения вида  $\lg L = \alpha \lg E - \beta$  (м), где параметр  $\alpha \approx 1/3$ , а  $E$  — энергия, выделяемая при возникновении дефекта в виде сейсмических волн, Дж. Таким образом, сейсмический мониторинг дает всю информацию, необходимую для прогноза разрушений с помощью концентрационного критерия.

Концентрационный критерий успешно применялся на различных масштабных уровнях: при среднесрочном прогнозе землетрясений [13, 14, 19] (как один из основных параметров в алгоритме построения карт ожидаемых землетрясений [20], один из параметров алгоритма М8 [21]),

при прогнозе горных ударов на Кировском руднике ПО “Апатит”, известно о положительных результатах его применения для данных со СКРУ-2 (Западный Урал) [22], Североуральского бокситового рудника и Таштагольского рудника [14].

Важно отметить, что при анализе сейсмических каталогов получаемые значения концентрационного параметра могут достаточно сильно зависеть от выбора выражения для оценки размера дефекта  $L_i$ , что может влиять на значение пороговой величины  $k_*$ .

### ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕЙСМИЧНОСТИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ ПРОГНОЗА ОБРУШЕНИЙ НА РУДНИКАХ

Традиционно при анализе каталогов сейсмических событий в качестве основных признаков возникновения опасной ситуации рассматривается значительное повышение сейсмической активности на локальном участке и/или регистрация единичных событий с мощным энерговыделением. Такой подход применялся в качестве основного для оценки текущей ситуации на медных рудниках Жезказганского месторождения [23, 24], на рудниках Норильска [25], шахтах ОАО “Воркутауголь” [26], рудниках Дальнего Востока [7, 27], Таштагольском руднике [28] и др. В частности, на рудниках Жезказганского месторождения значительная активизация слабой сейсмичности рассматривалась как признак для отнесения выемочных единиц к ослабленным, а регистрация на участке сейсмических событий с энерговыделением, большим  $10^4$  Дж, служила поводом для его отнесения к неустойчивым или к зоне интенсивных сдвижений [23, 24].

Для прогноза обрушений также используются представления многостадийной модели разрушения твердых тел о возникновении их при достижении дефектами некоторой критической концентрации [5, 22, 29, 30].

Кроме того, рядом исследователей для прогноза возникновения сильных сейсмических событий используются такие параметры, как наклон графиков повторяемости, фрактальные характеристики сейсмичности [5, 6]. Однако в большинстве случаев они не могут быть применены на практике для прогноза обрушений, поскольку число предвещающих их сейсмических событий мало и недостаточно для надежного определения указанных характеристик.

**Сейсмическая активность как мера опасности возникновения обрушений.** При анализе сейсмичности на рудниках широко применяются карты сейсмической активности. При этом значения сейсмической активности часто рассматривают в качестве уровня опасности возникновения крупного обрушения [25–27].

Значение сейсмической активности в некоторой точке определяется как число представительных сейсмических событий, зарегистрированных в некоторой ее окрестности (как правило, в круге заданного радиуса с центром в рассматриваемой точке). Таким образом, при построении карт сейсмической активности абсолютно не учитывается масштаб и время возникновения анализируемых сейсмических событий. В результате “зона влияния” каждого отдельного сейсмического события, где оно повышает уровень опасности, является фиксированной и не зависит ни от времени его возникновения, ни от размера соответствующего ему дефекта (рис. 2).

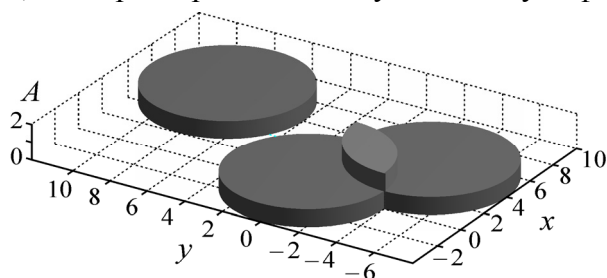


Рис. 2. Уровень сейсмической активности в районе, где зарегистрировано три сейсмических события; в качестве области анализа для расчета активности выбран круг постоянного радиуса

Принимая во внимание, что уровень напряжений вблизи дефекта и его “зона влияния” существенно зависят от его размера, можно говорить, что использование сейсмической активности в качестве оценки опасности возникновения крупных обрушений не соответствует физическим представлениям.

Более того, на конечный вид анализируемой карты сейсмической активности влияют минимальный уровень представительности анализируемого сейсмического каталога, временной отрезок, выбранный для анализа, и выбор области осреднения (ее форма, размер). Причем задание двух последних параметров — в значительной мере произвольно. Дополнительным неудобством в использовании уровня сейсмической активности для оценки опасности возникновения обрушения является проблема задания значения, которое можно было бы рассматривать в качестве критического уровня.

**Концентрационный параметр.** Для оценки опасности возникновения крупного разрушения в ряде случаев используют концентрационный параметр  $k$  [3, 5, 14, 22]. Для выяснения его физического смысла удобнее проанализировать построение обратной ему величины  $\frac{1}{k} = \frac{L_{av}}{D_{av}} = \frac{\sum L_i}{N^{2/3}V^{1/3}}$ , которую можно рассматривать как оценку уровня опасности возникновения обрушения. Соответственно построение  $1/k$  можно разбить на два этапа: построение  $\sum L_i$  (рис. 3) и нормировка полученной величины на  $N^{2/3}V^{1/3}$ .

Анализ рис. 3 показывает, что при построении  $1/k$  учитывается масштаб регистрируемых событий: уровень опасности в прилегающей к событию области возрастает на величину, пропорциональную размеру дефекта, соответствующего ему. При этом опасности, обусловленные каждым отдельным сейсмическим событием, складываются. Последующая нормировка на  $N^{2/3}V^{1/3}$ , где  $V = \text{const}$ , значительно уменьшает эффект сложения опасностей от различных событий.

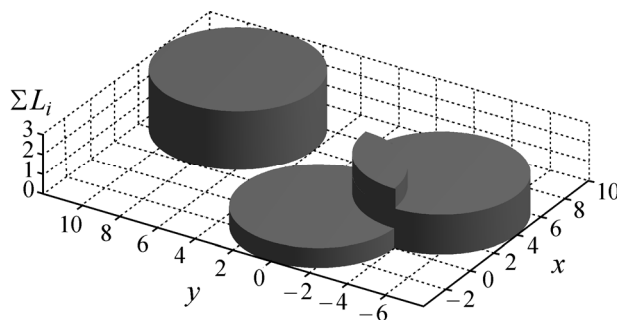


Рис. 3. Пример построения величины  $\sum L_i$  для трех сейсмических событий, характеризующихся различным размером дефектов

Еще одним преимуществом использования концентрационного параметра является возможность априорного задания критического значения, достижение которого будет говорить о высокой вероятности формирования крупного обрушения. Рассмотрение концентрационного параметра позволяет проводить совместный анализ пространственного и энергетического/масштабного распределений зарегистрированных событий. Изменения во временном распределении возникают, как правило, уже на стадии активного развития обрушения.

Вместе с тем при построении карт концентрационного параметра зона влияния каждого отдельного события, так же как и на картах сейсмической активности, является постоянной и не зависит от размера дефекта, что не соответствует тому факту, что крупные дефекты воз-

мушают поле напряжений вокруг себя на значительно большем удалении, чем мелкие. Кроме того, при используемом подходе размер зоны влияния задается в значительной мере произвольно.

**Параметр сближения сейсмических событий.** Дальнейшим развитием представлений о взаимодействии дефектов в местах их высокой концентрации является введение параметра сближения сейсмических событий, который служит модификацией концентрационного параметра [31]. При этом используется идея о том, что возникновение дефекта, соответствующего событию, приводит к формированию вблизи него зоны с повышенными напряжениями, назовем ее зоной влияния сейсмического события. Причем, чем больше размер дефекта, тем дальше распространяется зона его влияния. Пересечение зон влияния отдельных событий может приводить к взаимодействию соответствующих им дефектов с последующим их объединением.

Параметр сближения сейсмических событий  $\kappa$  является безразмерной величиной и рассчитывается для каждой пары событий с индексами  $i$  и  $j$  без применения процедуры осреднения, он характеризует возможность взаимодействия событий с индексами  $i$  и  $j$ :

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

где  $d_{ij}$  — расстояние между гипоцентрами / эпицентрами событий;  $L_i$ ,  $L_j$  — размеры соответствующих им дефектов.

Условие возникновения опасной ситуации  $\kappa_{ij} < \kappa_*$  (где  $\kappa_*$  — критическое значение из концентрационного критерия) можно записать в виде  $\kappa_{ij} = \frac{d_{ij}}{(L_i + L_j)/2} < \kappa_*$  или  $d_{ij} < \kappa_*(L_i + L_j)/2$ .

В рамках данного подхода взаимодействие двух дефектов возможно, если пересекаются зоны их влияния, имеющие радиус

$$r = \kappa_* L / 2. \quad (1)$$

Чем крупнее дефект, соответствующий событию, тем больше размер этой зоны. Цепочки из данных зон образуют опасные области, где можно ожидать возникновения обрушения (рис. 4). При этом учитывается пространственное распределение событий и их масштаб.

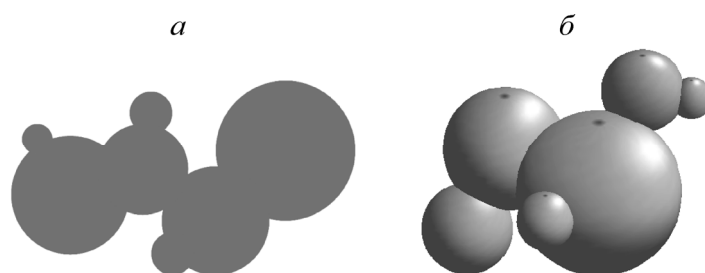


Рис. 4. Цепочки из зон влияния событий, образующие потенциально опасные области:  $a$  — на плоскости (если нет данных о глубине);  $b$  — в пространстве

Анализ значений параметра сближения успешно применяется для выделения опасных зон на Жезказганском медном месторождении [29, 30]. Он также продемонстрировал свою эффективность при ретроспективном прогнозе горных ударов на Североуральском бокситовом руднике [17, 31].

### ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПАРАМЕТРА СБЛИЖЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ С ПОЗИЦИЙ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ

Приведенная модификация концентрационного критерия разрушения твердых тел с введением параметра сближения сейсмических событий хорошо согласуется с представлениями механики разрушения. Типичной формулой для напряжений вокруг трещины размером  $L$  на расстоянии  $r$  является

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

где  $f_{\theta}(\theta)$  — функция распределения напряжений по угловой координате, а коэффициент интенсивности  $K$  обычно представляется в виде  $K = \sigma_e \sqrt{\pi L Y}$ , здесь  $Y$  — “ $K$ -тарировка”, зависящая от величины  $L$  и геометрии участка массива;  $\sigma_e$  — внешнее напряжение, действующее на участок массива с трещиной [32, 33]. Тогда выражение для напряжений приобретает вид

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

Ориентация дефектов в массиве горных пород, как правило, не известна, поэтому в первом приближении предлагается заменить  $f_{\theta}(\theta)$  на константу. Таким образом, если в выражении (2) пренебречь зависимостью от угловой координаты, то получится, что радиус опасной зоны вокруг трещины (зоны повышенных напряжений) задается размером дефекта  $L$ . Величина  $L$  также задает радиус зоны влияния события в модифицированном концентрационном критерии.

Из выражения (2) можно получить радиус области вокруг события, в пределах которой действующие напряжения превышают величину  $\sigma$ :

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

здесь параметр  $\kappa'(\sigma, \theta, \sigma_e) = \frac{(\sigma_e Y f_{\theta}(\theta))^2}{\sigma^2}$  зависит от уровня действующих напряжений  $\sigma$  и является аналогом критического значения  $\kappa_*$  в выражении (1). Важно отметить, что значение параметра  $\kappa'$ , а вместе с ним и  $\kappa_*$  должно возрасть при увеличении уровня напряжений  $\sigma_e$ , действующих в массиве.

Если предположить, что уровень напряжений  $\sigma_e$  постоянен и пренебречь влиянием вариаций  $Y$  и  $f_{\theta}(\theta)$ , то получится, что критическому значению концентрационного параметра / параметра сближения событий можно поставить в соответствие критическое значение напряжения. В этом случае модифицированный критерий разрушения будет совпадать с распространенными в инженерной практике критериями разрушения, в которых предполагается возникновение разрушения в результате достижения напряжениями критических значений. Принимая во внимание принцип суперпозиции упругих напряжений, в соответствии с которым напряжения, вызванные отдельными трещинами, складываются, для оценки опасности формирования обрушения в точке с координатами  $x_j, y_j, z_j$  можно ввести параметр

$$S(x_j, y_j, z_j) = \sum_i \sqrt{\frac{L_i}{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}}},$$

где  $L_i$  — длина трещины. Согласно выражению (2), параметр  $S$  пропорционален сумме напряжений, создаваемых трещинами. По каталогам сейсмических событий легко построить карты параметра  $S$ . Параметры подобной структуры используются и при прогнозе землетрясений [34].

Аналогичным образом для выделения зон влияния сейсмических событий можно строить карты параметра сближения сейсмических событий:

$$\kappa(x_j, y_j, z_j) = \min_i \left[ \left( \frac{L_i}{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}} \right)^{-1} \right].$$

Пример выделения опасных областей за несколько дней до обрушения в панелях Ю-4, Ю-2 и 5а Жезказганского месторождения с помощью параметра сближения сейсмических событий и параметра  $S$  показан на рис. 5. Обрушение началось с расположенной на глубине 200 м панели Ю-4 и затем охватило соседние выработки. Его наиболее активная фаза пришлась на ноябрь 2008 г. В мае 2009 г. над обрушенной областью сформировался прогиб с оседаниями до 5 м. Обширные области с критическим сближением сейсмических событий сформировались на данном участке еще в конце 2007 г. С этого времени он рассматривался как участок с высокой опасностью возникновения обрушения [30].

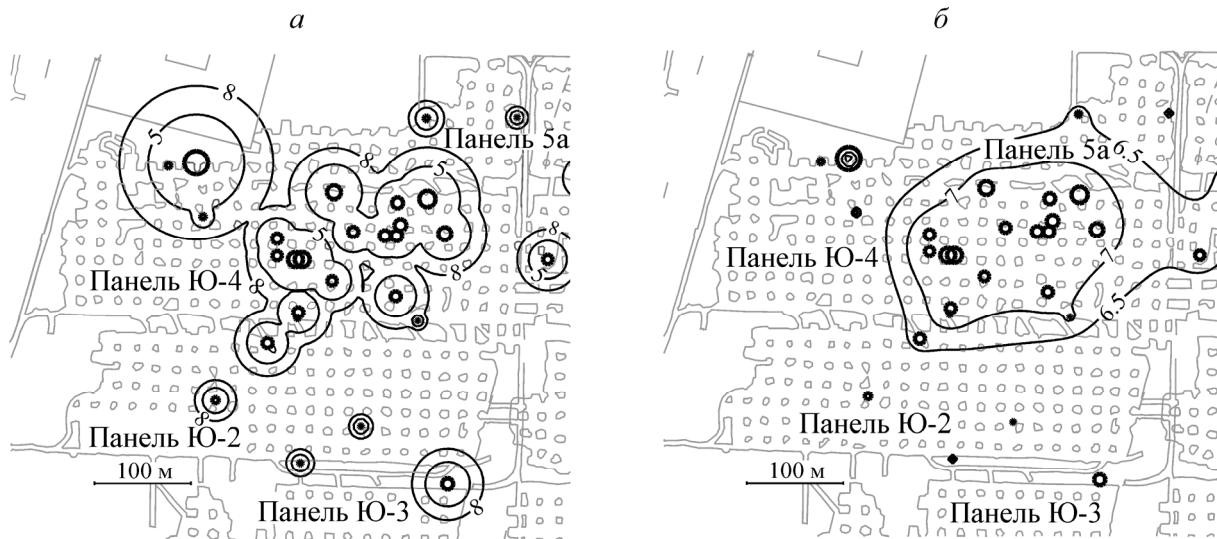


Рис. 5. Выделение опасных областей перед развитием обрушения: *a* — с помощью параметра сближения сейсмических событий  $\kappa$ ; *b* — с помощью параметра  $S$ ; жирные окружности — зарегистрированные сейсмические события; тонкие черные линии — изолинии параметров  $\kappa$  ( $\kappa = 5$ ,  $\kappa = 8$ ) и  $S$  ( $S = 6.5$ ,  $S = 7$ ), серым цветом показаны контуры выработок и породных целиков, поддерживающих кровлю

Первые попытки применения параметра сближения сейсмических событий для реального прогноза на Жезказганском месторождении предприняты в 2005 г. Несмотря на то, что на тот момент были доступны только данные о сейсмичности, полученные результаты оказались успешными — удалось предотвратить крупное разрушение [29]. С сентября 2007 г. на месторождении данный критерий внедрен в качестве основного. За это время были спрогнозированы все основные обрушения. Первый прогноз опасности возникновения делается, как правило, за месяц до реализации обрушения [30].



## **ВЫДЕЛЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ БРЕШЕЙ И МИГРАЦИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ ДЛЯ ПРОГНОЗА ОБРУШЕНИЙ**

Дополнительными важными предвестниками готовящегося крупного обрушения являются “сейсмические бреши” первого и второго рода (области со слабой сейсмической активностью), а также миграция сейсмичности [35]. Указанные параметры получили распространение в сейсмологии при прогнозе землетрясений.

Сейсмическая брешь первого рода — это практически незатронутая сейсмичностью область, находящаяся в окружении областей, где в недавнем прошлом наблюдались сильные сейсмические события и происходили разрушения и обрушения. При этом она служит своеобразным барьером между ними, находящимся, как правило, под действием повышенной нагрузки. Ее обрушение может привести к возникновению сильного события с объединением прилегающих обрушенных областей.

Перераспределение напряжений, вызванное возникновением обрушения, может также стать причиной возникновения миграции сейсмичности с последовательным обрушением соответствующих областей. Установление таких трендов в развитии процесса разрушения позволит прогнозировать место будущего обрушения.

Сейсмической бреши второго рода соответствует область, где наблюдается временное затихие сейсмической активности, необходимое для аккумуляции энергии для ее окончательного разрушения. Часто вокруг данных областей одновременно наблюдается активизация сейсмичности с формированием так называемых кольцевых форм, которые очерчивают контур готовящегося обрушения.

Выявление сейсмических брешей и миграции сейсмических событий использовалось при прогнозе обрушений на Жезказганском месторождении [29, 30]. Дополнительное повышение эффективности прогноза достигалось путем сопоставления данных сейсмического мониторинга с актами визуальных обследований подземных выработок, с их геомеханическими планами, результатами дополнительного геомеханического анализа (прежде всего с расчетами коэффициента запаса прочности целиков), а также с геодезическими измерениями оседаний вдоль профилейных линий на дневной поверхности.

### **ВЫВОДЫ**

Рассмотрение современных представлений о разрушении горных пород позволяет говорить о том, что каждый дефект готовится накоплением более мелких дефектов. Это в свою очередь свидетельствует о принципиальной возможности прогноза разрушений, в том числе и крупных.

Анализ возможностей использования карт сейсмической активности в качестве оценки опасности возникновения крупного обрушения показал, что данный подход не соответствует физическим представлениям о процессе разрушения горных пород. Главным его недостатком является то, что он не учитывает размер образующихся дефектов, которые соответствуют сейсмическим событиям, ни в уровне опасности, ни в размере зоны влияния отдельного сейсмического события. Размер зоны влияния отдельных сейсмических событий остается постоянным и при построении карт значений концентрационного параметра.

Для сопоставления концентрационного критерия разрушения твердых тел с результатами механики разрушения предлагается параметр сближения сейсмических событий. Данный параметр позволяет уйти от осреднения, используемого в концентрационном критерии разрушения, и проводить детальный анализ распределения дефектов в пространстве, а также учитывать

влияние их размеров на опасность возникновения крупного обрушения. При этом размер зоны влияния отдельного события пропорционален оценке размера дефекта, соответствующего данному событию.

С сентября 2007 г. на Жезказганском медном месторождении достижение параметром сближения сейсмических событий критической величины используется в качестве основного критерия возникновения опасной ситуации. Начиная с этого времени спрогнозированы все основные обрушения. Первый прогноз опасности возникновения делается, как правило, за месяц до реализации обрушения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куксенко В. С., Инжеваткин И. Е., Манжиков Б. Ц., Станчиц С. А., Томилин Н. Г., Фролов Д. И. Физические и методические основы прогнозирования горных ударов // ФТПРПИ. — 1987. — № 1.
2. Tomilin N. G., Voinov K. A. Technique and results of the rock burst prediction, Proceedings of the International Conference on Mechanics of jointed and faulted rock, Rotterdam: Balkema, 1995.
3. Маловичко А. А., Завьялов А. Д., Козырев А. А. Горные удары // Природные опасности России. Т. 1. Сейсмические опасности. — М.: Крук, 2000.
4. Mansurov V. A. Prediction of Rockbursts by Analysis of Induced Seismicity Data. Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sci., 2001, Vol. 38, No. 6.
5. Сейсмичность при горных работах / под ред. Н. Н. Мельникова. — Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2002.
6. Техногенная сейсмичность при горных работах: модели очагов, прогноз, профилактика: сб. докл. Междунар. совещ. Т. 2. — Апатиты: КНЦ РАН, 2004.
7. Рассказов И. Ю., Аникин П. А., Мигунов Д. С., Искра А. Ю. Результаты геоакустического контроля удароопасности на рудниках Дальнего Востока // ГИАБ. — 2008. — № 11.
8. Журков С. Н., Куксенко В. С., Петров В. А., Савельев В. Н., Султонов У. С. О прогнозировании разрушения горных пород // Изв. АН СССР. Физика Земли. — 1977. — № 6.
9. Куксенко В. С. Кинетические аспекты процесса разрушения и физические основы его прогнозирования // Прогноз землетрясений. — Душанбе–Москва: Дониш. — 1983. — № 4.
10. Дамаскинская Е. Е., Куксенко В. С., Томилин Н. Г. Двухстадийная модель разрушения горных пород // Физика Земли. — 1994. — № 10.
11. Журков С. Н. Кинетическая концепция прочности твердых тел // Вестн. АН СССР. — 1968. — № 3.
12. Журков С. Н., Куксенко В. С., Петров В. А., Савельев В. Н., Султонов У. С. Концентрационный критерий объемного разрушения твердых тел // Физические процессы в очагах землетрясений / под ред. М. А. Садовского, В. И. Мячкина. — М.: Наука, 1980.
13. Соболев Г. А., Завьялов А. Д. О концентрационном критерии сейсмогенных разрывов // ДАН СССР. — 1980. — Т. 252. — № 1.
14. Завьялов А. Д. Среднесрочный прогноз землетрясений. — М.: Наука, 2006.
15. Ребецкий Ю. Л. Состояние и проблемы теории прогноза землетрясений. Анализ основ с позиции детерминированного подхода // Геофиз. журн. — 2007. — Т. 29. — № 4.
16. Макаров П. В., Смолин И. Ю., Стефанов Ю. П., Кузнецов П. В., Трубицын А. А., Трубицына Н. В., Ворошилов С. П., Ворошилов Я. С. Нелинейная механика геоматериалов и геосред. — Новосибирск: Гео, 2007.

17. **Герман В. И., Мансуров В. А.** Мониторинг индуцированной сейсмичности и процедура выделения очагов горных ударов // ФТПРПИ. — 2002. — № 4.
18. **Мячкин В. И., Костров Б. В., Соболев Г. А., Шамина О. Г.** Основы физики очага и предвестники землетрясений // Физика очага землетрясения. — М.: Наука, 1975.
19. **Завьялов А. Д.** От кинетической теории прочности и концентрационного критерия разрушения к плотности сейсмогенных разрывов и прогнозу землетрясений // ФТГ. — 2005. — Т. 47. — № 6.
20. **Соболев Г. А., Челидзе Т. Л., Завьялов А. Д., Славина Л. Б., Николадзе В. Е.** Карты ожидаемых землетрясений, основанные на комплексе сейсмологических признаков // Изв. АН СССР. Физика Земли. — 1990. — № 11.
21. **Кособоков В. Г.** Прогноз землетрясений: основы, реализация, перспективы // Прогноз землетрясений и геодинамические процессы. Ч. I (Вычислительная сейсмология, вып. 36). — М.: ГЕОС, 2005.
22. **Маловичко А. А., Маловичко Д. А., Дягилев Р. А.** Сейсмологический мониторинг на рудниках Верхнекамского месторождения калийных солей // Горн. журн. — 2008. — № 10.
23. **Методические указания по экспресс-оценке состояния выработанного пространства Жезказганского месторождения.** — Караганда, 1999.
24. **Алипбергенов М. К., Мансуров В. А., Сатов М. Ж., Макаров А. Б.** Современный комплексный мониторинг — надежный инструментарий для повышения эффективности и безопасности горных работ // Горн. журн. — 2002. — № 5.
25. **Мулев С. Н., Марысюк В. П., Анохин А. Г., Наговицин Ю. Н.** Причины, признаки и критерии повышения сейсмоактивности на глубоких рудниках Норильска // Горн. журн. — 2011. — № 2.
26. **Беляева Л. И., Скакун А. П., Мулев С. Н.** Методика прогноза удароопасного состояния массива в сейсмогеологических условиях поля шахты “Комсомольская” // ГИАБ. — 2009. — № 12.
27. **Рассказов И. Ю.** Контроль и управление горным давлением на рудниках Дальневосточного региона. — М.: Горн. книга, 2008.
28. **Указания по безопасному ведению горных работ на месторождениях Горной Шории, склонных к горным ударам.** — Новокузнецк, 1991.
29. **Мансуров В. А., Герман В. И.** Прогноз обрушений на Жезказганском месторождении по данным сейсмического мониторинга // Горн. журн. — 2007. — № 1.
30. **Герман В. И., Мансуров В. А.** Прогноз обрушений на Жезказганском медном месторождении // ГИАБ. — 2010. — № 1.
31. **Герман В. И.** Разработка формализованной методики выделения микросейсмических данных, соответствующих подготовке горных ударов // Физические основы прогнозирования разрушения горных пород: материалы 1-й Междунар. школы-семинара. — Красноярск: СибГАУ, 2002.
32. **Партон В. З.** Механика разрушения: от теории к практике. — М.: Наука, 1990.
33. **Das S., Scholz C. H.** Theory of Time-Dependent Rupture in the Earth, J. Geophys. Res, 1981, Vol. 86.
34. **Kagan Y.Y., Jackson D.D.** Probabilistic forecasting of earthquakes, Geophys. J. Int., 2000, Vol. 143, No. 2.
35. **Могги К.** Предсказание землетрясений / пер. с англ. — М.: Мир, 1988.

*Поступила в редакцию 2/X 2013*