

УДК 622.831.32 + 550.343

В.И. Герман, В.А. Мансуров

ПРОГНОЗ ОБРУШЕНИЙ НА ЖЕЗКАЗГАНСКОМ МЕДНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ

Рассматриваются проблемы прогноза крупных обрушений на примере Жезказганского медного месторождения. Приводятся основные физические представления о процессе разрушения твердых тел. Описывается и обосновывается модифицированный концентрационный критерий разрушения твердых тел, который является основным подходом для прогноза обрушений на Жезказганском месторождении, приводятся данные о дополнительных методах прогноза, об организации работ по контролю за выработанными пространствами на Жезказганском месторождении. Приведен пример прогноза возникновения обрушения на одном из участков месторождения.

Ключевые слова: Жезказганское месторождение, сейсмический мониторинг, энергоснабжение, медное месторождение.

Семинар № 3

Жезказганское месторождение меди (ЖММ) отрабатывается камерно-столбовой системой. Оно включает 5 рудников и охватывает площадь 10x7 км.

Достаточно активная его эксплуатация ведется с середины 20 века. В результате шло увеличение площади подработки земной поверхности, возрастание числа перекрытий, отработанных залежей и снижение площади несущего нагрузку массива горных пород. К настоящему времени открытое выработанное пространство имеет суммарный объем порядка 180 млн. м³ и поддерживается десятками тысяч междуканальных целиков.

С середины 90-х годов прошлого века в геомеханической обстановке на ЖММ начали происходить качественные изменения, проявляющиеся в объединении отдельных участков в крупные ослабленные районы и обрушениях налегающей толщи на больших площадях, зачастую с выходом на дневную поверхность [Герасименко и др., 2002]. Такие обруше-

ния часто сопровождались разрушением наземных и подземных сооружений и коммуникаций и представляли серьезную опасность для жизни людей.

В настоящее время большая часть запасов уже извлечена и широко применяется повторная отработка, что придает дополнительную остроту проблеме прогноза обрушений. При этом значительная часть выработок уже обрушена (находится в ослабленном/неустойчивом состоянии). Многие обрушения имеют выход на поверхность (площадь около 5-6 км²). Прирост их площади в 2007-2008 гг. составил около 1 км².

Организация работ по геомониторингу на Жезказганском месторождении

Для обеспечения безопасных условий отработки рудных залежей, а также для принятия правильных и своевременных решений по управлению горным давлением (в том числе и погашению отработанных участков для повышения устойчивости подзем-

ных обнажений) необходимо осуществлять геомониторинг массива горных пород.

Одним из эффективных методов контроля за текущим состоянием массива горных пород является применение сейсмического мониторинга. Сейсмическая сеть регистрирует упругие волны, генерируемые при разрушениях, происходящих в массиве горной породы. Их анализ с применением методов сейсмологии, позволяет определить координаты места и время, произошедшего разрушения, а также его масштаб (энерговыведение). При этом, зная энерговыведение E , можно оценить линейный масштаб образовавшего дефекта L , соответствующего разрушению. Основными достоинствами метода сейсмического мониторинга являются: близкий к режиму реального времени, контроль за состоянием выработок на больших площадях, контроль за областями к которым нет доступа. Он успешно применяется на ЖММ в качестве основного метода для прогноза обрушений.

Помимо сейсмического мониторинга на ЖММ проводятся визуальные наблюдения за изменением состояния выработок и измерения оседаний поверхности вдоль профильных линий. Они ведутся в соответствии с регламентом. Внеочередные наблюдения проводятся на участках, где отмечается значительное ухудшение геомеханической ситуации. В частности регистрация сейсмических событий является сигналом для проведения внеочередного визуального обследования области их возникновения, в ряде случаев для нее также проводится дополнительный геомеханический анализ. Сейсмический мониторинг также важен и наиболее информативен при отслеживании развития процесса разрушения после

его начала, когда доступ интересующему участку закрыт.

На Жезказганском месторождении эксплуатировались различные сейсмические системы [Мансуров, Герман, 2007]. С 2007 г. в качестве основной системы сейсмического мониторинга используется система последнего поколения производства компании ISS International (ЮАР). В настоящее время она включает 20 датчиков. В силу их поверхностного расположения и большой площади контролируемой области глубина возникновения сейсмических событий не рассчитывается. Анализ размеров зон афтершоковой активности (зон, где наблюдалась активность сразу после обрушения) показал, что для ЖММ можно использовать следующую связь:

$$L(\text{м}) \approx 0,5 \sqrt[3]{E(\text{Дж})}.$$

В результате обработки информации регистрируемой применяемыми системами сейсмического мониторинга был создан каталог сейсмических событий, зафиксированных на рудниках месторождения, который содержит более 6 400 записей. С 1997 г. чувствительность используемой системы сейсмического мониторинга позволяла надежно регистрировать события с энерговыведением большим величины $E_{\min} = 10^{3,6}$ Дж по всей площади месторождения, в результате повышения чувствительности системы с 1999 г. – $E_{\min} = 10^{3,1}$ Дж, а с 2002 г. – $E_{\min} = 10^{2,6}$ Дж.

Физические представления о процессе разрушения горных пород

Для прогноза обрушений на рудниках необходимо определиться с механизмом их возникновения.

В качестве базовой модели разрушения горных пород рассматривается двухстадийная модель разрушения твердых тел [Дамаскинская и др, 1994].

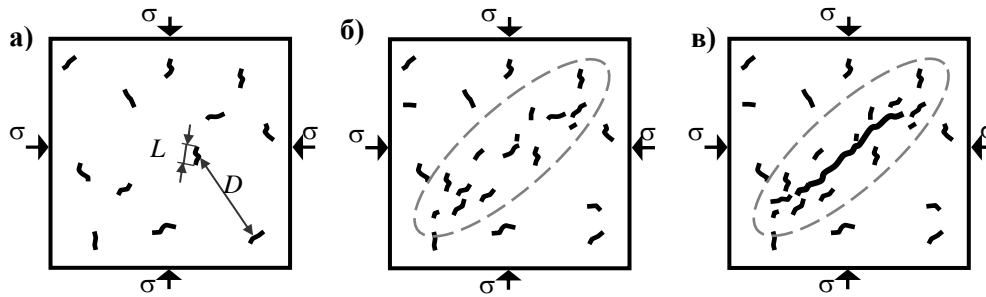


Рис. 1 Схема двухстадийной модели разрушения твердых тел: а) некоррелированное накопление дефектов / трещин $J-1$ ранга, б) концентрация дефектов $J-1$ ранга, в) образование дефекта следующего J ранга

Согласно нее каждое разрушение/дефект/трещина J ранга/масштаба готовится более мелкими дефектами $J-1$ ранга. На первом этапе идет случайное квазиравномерное накопление разрушений $J-1$ ранга. Затем вследствие неоднородности среды и локальных перегрузок формируются области, где концентрация таких разрушений будет повышенной и где создаются условия для взаимодействия и объединения дефектов. На заключительном этапе при достижении концентрации дефектов $J-1$ ранга в данной области критического порогового уровня в ней образуется разрушение J ранга. Далее аналогичным образом из дефектов J ранга формируются разрушения $J+1$ ранга и т.д.

В результате лабораторных экспериментов на различных материалах был установлен также концентрационный критерий разрушения твердых тел, определяющий условия возникновения дефекта следующего масштабного уровня / ранга. Он возникает при условии, если 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_* . [Журков и др., 1980].

Теоретическое значение $k_* \approx 3$, но в реальных условиях для разрушений в массиве горных пород $k_* \approx 5...10$ [Герман, Мансуров, 2002].

В соответствии с двухстадийной моделью разрушения твердых тел, сформулированной на основе данных лабораторных экспериментов, существует единый физический механизм развития разрушения, что говорит о самоподобии разрушения на разных масштабных уровнях. В пользу самоподобия разрушения горных пород на разных масштабных уровнях свидетельствует то, что в сейсмологии также хорошо известна и нашла широкое применение подобная модель. Она получила название модель лавинообразного накопления трещиноватости [Мячкин и др., 1975]. Концентрационный критерий также успешно применялся на различных масштабных уровнях: при среднесрочном прогнозе землетрясений [Соболев, Завьялов, 1980] (в частности как один из основ-

ных параметров в алгоритме построения карт ожидаемых землетрясений [Соболев и др., 1990]), при прогнозе горных ударов на Кировском руднике ПО «Апатит», известно о положительных результатах его применения для данных со СКРУ-2 (Западный Урал), Североуральского бокситового рудника и Таштагольского рудника [Завьялов, 2006].

Концепция самоподобия процесса разрушения горных пород на разных масштабных уровнях позволяет использовать результаты, полученные в сейсмологии при лабораторных испытаниях, прогнозировать свойства сильной сейсмичности, на основе изучения закономерностей возникновения слабых сейсмических событий (о них значительно больше информации).

Прогноз обрушений на Жезказганском месторождении

Традиционным подходом к оценке опасности по данным сейсмического мониторинга на ЖММ являлось рассмотрение в качестве основных признаков возникновения опасной ситуации: значительное повышение сейсмической активности на локальном участке и/или регистрация единичных событий с мощным энерговыделением.

Значительная активизация слабой сейсмичности рассматривалась как признак для отнесения выемочных единиц к ослабленным, а регистрация на рассматриваемом участке сейсмических событий с энерговыделением большим 10^4 Дж служило поводом для его отнесения к неустойчивым или к зоне интенсивных сдвижений [Методические ..., 1999].

Дополнительно для локального прогноза обрушений на ЖММ были попытки применения подхода, основанного на анализе активности процесса разрушения, развиваемый в

ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН [Куксенко и др., 1987]. Он достаточно успешно применялся ранее на СУБРе [Tomilin, Voinov, 1995; Mansurov, 2001] для прогноза горных ударов. Критерием перехода рассматриваемого участка массива в опасное состояние (перехода процесса разрушения на следующий масштабный уровень) считалось уменьшение со временем средних значений временных интервалов между хронологически последовательными сейсмическими событиями в нем с одновременным увеличением их коэффициента вариации (отношения среднего квадратического отклонения к среднему значению). Апробация данного подхода на ЖММ показала свою полезность для прогнозирования такого класса динамических явлений как обрушения [Mansurov, 2002]. Однако время его наступления не могло быть оценено с большой степенью достоверности, что связано с большой скоростью протекания последней стадии, а также с недостаточной чувствительностью системы мониторинга, не позволяющей регистрировать достаточное число предваряющих обрушение слабознергетических событий.

В связи со скоротечностью обрушений на ЖММ особое значение приобретает анализ пространственного и энергетического/масштабного распределений зарегистрированных событий, а также их изменения со временем. Применение концентрационного критерия разрушения твердых тел [Журков и др., 1980] позволяет проводить такой анализ.

В настоящее время основным методом выделения опасных зон на основе данных сейсмического мониторинга на рудниках ЖГМК является модифицированный концентрационный критерий разрушения твердых тел [Герман, 2002; Герман, Мансу-

ров, 2002, Мансуров, Герман, 2007]. При этом для оценки концентрации дефектов использовался не концентрационный параметр k , а параметр сближения сейсмических событий κ , 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 :

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

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

Условие возникновения опасной ситуации $\kappa_{ij} < \kappa_*$ можно записать в

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

$$d_{ij} < (\kappa_* L_i + \kappa_* L_j) / 2.$$

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

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:

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

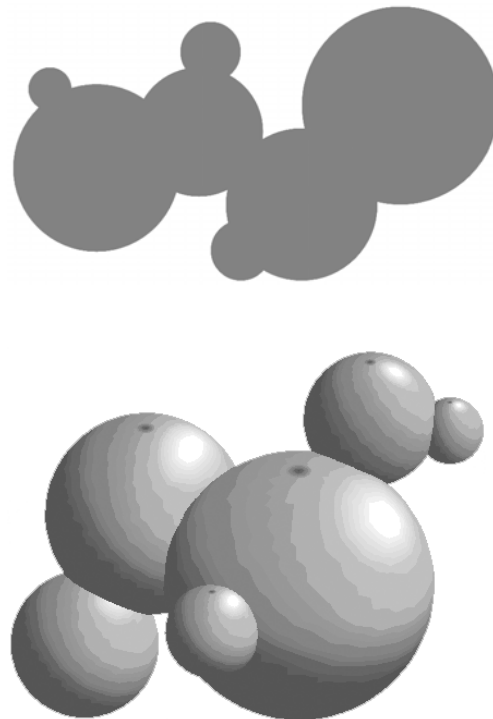


Рис. 2 Цепочки из зон влияния событий, образующие потенциально опасные области: а) на плоскости (если нет данных о глубине), б) в пространстве

[Партон, 1990, 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 – “ K -тарировка”, σ_e – внешнее напряжение, действующее на трещину [Партон, 1990, с. 102; Das, Scholz, 1981], тогда выражение для напряжений приобретает вид:

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

откуда

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

Таким образом, если 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 ЖММ цепочки зон вокруг событий с радиусом $k_*L/2$ рассматриваются как наиболее опасные. Для условий ЖММ 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 Жезказганского месторождения, 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 $k_* \approx 5...8$.

При необходимости разделения процессов разрушения на различных горизонтах применяется соответствующая фильтрация событий. Как правило, для анализа используются данные зарегистрированные за последние два года. Еще одной особенностью оценки сейсмической опасности является то, что события, имеющие энерговыделение $E > E_{max}$, при расчете их размера L рассматриваются как события с $E = E_{max}$, это позволяет избежать излишнего увеличения зоны влияния такого сильного сейсмического события. Как правило, $E_{max} \approx 100E_{min}...1000E_{min}$ [Герман, Мансуров, 2002].

Для применения концентрационного критерия разрушения также важно то, что каждое сильное событие готовят события, энерговыделение которых до трех десятичных порядков меньше [Герман, Мансуров, 2002], т.е. для прогноза событий с энерговыделением E сейсмическая сеть должна уверенно регистрировать события с энерговыделением $E/1000$. Кроме того, анализ выражения для вычисления K показывает, что для его определения с ошибкой, не превышающей 50%, сейсмическая сеть должна позволять:

- находить координаты гипоцентров событий с ошибкой, не превышающей двух линейных размеров дефекта, соответствующего событию (порядка 10 метров для слабых событий),

- достаточно точно определять энерговыделение сейсмического события, используемое для расчета линейного размера дефекта, с ошибкой, не превышающей 300% (0,5 десятичного порядка по энерговыделению).

К сожалению, установленные системы мониторинга не всегда позволяют регистрировать события с необходимой точностью, что в ряде случаев может значительно снижать эф-

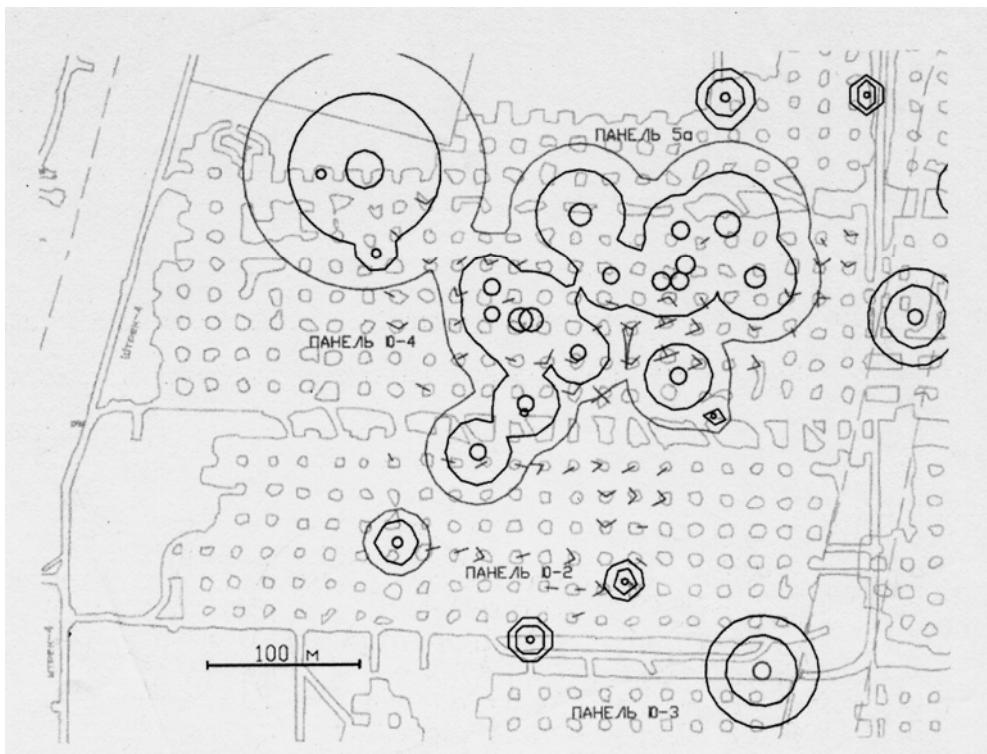


Рис. 3. Ситуация в рассматриваемом районе до обрушения

фективность описанной процедуры прогноза. Решить эту проблему предполагается расширением установленной системы мониторинга, с увеличением плотности сети датчиков.

Первые попытки применения модифицированного концентрационного критерия для реального прогноза на ЖММ были предприняты в 2005 г. Полученные результаты, тогда имелись только данные о сейсмичности, были успешными – удалось спрогнозировать крупное разрушение [Мансуров, Герман, 2007]. С сентября 2007 г. на ЖММ данный критерий был внедрен в качестве основного. За это время были спрогнозированы все основные обрушения. Первый прогноз опасности возникновения делается, как правило, за месяц до реализации обрушения.

Дополнительными важными предвестниками готовящегося крупного обрушения являются «сейсмические брешы» первого и второго рода (области со слабой сейсмической активностью), а также миграция сейсмичности [Моги, 1988].

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



Рис. 4. Ситуация в рассматриваемом районе после начала обрушения

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

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

Дополнительное повышение эффективности прогноза достигается при сопоставлении данных сейсмического мониторинга и их анализа с актами о визуальных обследованиях 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 профильных линий на дневной поверхности.

Пример прогноза обрушения на Жезказганском месторождении

Рассмотрим пример прогноза одного из недавно произошедшего обрушения, охвативших панели Ю-4, Ю-2 и 5а (см. рис. 3, 4). Его наиболее активная фаза, сопровождающаяся высокой сейсмической активностью,

пришлась на 17-18 ноября 2008 г. Глубина работ на данном участке соответствует 200 м. С запада и востока область ограничена флексурами. За восточной флексурой идет обрушенный участок.

На рис. 3 представлена ситуация сложившаяся до начала обрушения, на 17.11.2008. На нем показано состояние целиков, установленное в результате визуальных обследований. Черточки на целиках отражают степень их нарушенности: одна черточка соответствует тому, что около 10% целика потеряло несущую способность, две черточки – около 30% и три черточки – около 60%.

На рис. 3 показаны сейсмические события, зарегистрированные с 2006 г. им соответствуют маленькие жирные окружности (их диаметр соответствует удвоенному размеру дефекта). Скорость накопления событий с 2006 г. была приблизительно постоянной. Некоторое ее снижение отмечалось только в первой половине 2007 г. и с сентября по ноябрь 2008 г.

На рис. 3 представлены также контуры постоянных значений параметра сближения событий. Черные внутренние контуры соответствуют значению параметра сближения, равному 5 (критическая область), а большие серые контуры – параметру сближения, равному 8 (потенциально опасная область). Формирование достаточно обширных областей с критическим сближением событий в рассматриваемом районе отмечалось уже в конце 2007 г. Именно с этого времени на основе данных сейсмического мониторинга данный район стал рассматриваться как район с опасностью возникновения обрушения.

Как видно из рис. 3 наблюдается достаточно хорошее совпадение об-

ластей с наибольшими нарушениями целиков и областями, где было зарегистрировано наибольшее число сейсмических событий. Области с нарушенными целиками также хорошо совпадают с контурами постоянных значений параметра сближения сейсмических событий.

На рис. 4 представлена ситуация в рассматриваемом районе в первое время после обрушения, на 22.01.2009. События и нарушения целиков до 17.11.2008 показаны серым цветом, а после – черным.

Видно, что было зарегистрировано достаточно много новых сейсмических событий, в том числе несколько со значительным энерговыделением. Большинство событий были зарегистрированы в восточной части рассматриваемого района. Значительно выросла площадь областей с нарушениями целиков, возросла также степень нарушенности. Область возникновения новых сейсмических событий и новых нарушений в целиках достаточно хорошо совпадает с ранее выделенными контурами малых значений параметра сближения. Таким образом был сделан успешный заблаговременный прогноз обрушения.

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 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герасименко В. И., Юн А. Б., Ибраев Т. Т. Проблемы геомеханики при разработке Жезказганского месторождения. Горный журнал, 2002. №5.
2. Дамаскинская Е. Е., Куксенко В. С., Томилин Н. Г. Двухстадийная модель разрушения горных пород // Физика Земли. – 1994. № 10.
3. 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.
4. Герман В. И., Мансуров В. А. Мониторинг индуцированной сейсмичности и процедура выделения очагов горных ударов // ФТПРПИ. — 2002. — № 4.
5. Мячкин В. И., Костров Б. В., Соболев Г. А., Шамина О. Г. Основы физики очага и предвестники землетрясений. // Физика очага землетрясения. М.: Наука, 1975. С. 6–29.
6. Соболев Г. А., Завьялов А. Д. О концентрационном критерии сейсмогенных разрывов. // ДАН СССР. 1980. Т. 252. № 1. С. 69–71.
7. 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. С. 45–54.
8. Завьялов А. Д. Среднесрочный прогноз землетрясений. – М.: Наука, 2006.
9. Методические указания по экспресс-оценке состояния выработанного пространства Жезказганского месторождения, Караганда, 1999.
10. 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. С. 9–22.
11. 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. P. 955–959.
12. Mansurov V. A. Prediction of Rockbursts by Analysis of Induced Seismicity Data // Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sci., 2001. Vol. 38, № 6. P. 893–901.
13. Мансуров В. А., Герман В. И. Прогноз обрушений на жезказганском месторождении по данным сейсмического мониторинга // Горный журнал. – 2007. – № 1.
14. 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.
15. Партон В. З. Механика разрушения: от теории к практике. – М.: Наука. 1990. 240 с.
16. Das S., Scholz C. H. Theory of Time-Dependent Rupture in the Earth. // J. Geophys. Res., v. 86, 1981. P. 6039–6051.
17. Мотт К. Предсказание землетрясений: Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. **ИЛАС**

Коротко об авторах

Герман В.И. – кандидат технических наук, доцент, germanv@rambler.ru, ГОУ ВПО «Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева», ТОО «Корпорация Казахмыс»,

Мансуров В.А. – доктор физ.-мат. наук, профессор, geomans43@rambler.ru, ТОО «Корпорация Казахмыс», р. тел. (71063) 34546, ГОУ ВПО «Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева».