

УДК 622:831:538

**Концентрационная модель разрушения твердых тел и прогнозирование
катастрофических ситуаций крупномасштабных объектов**

В.С. Куксенко¹, Х.Ф.Махмудов¹, Б. Ц. Манжиков².

Х.Ф.Махмудов¹ Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН

194021 С-Петербург, Политехническая 26, Россия

h.machmoudov@mail.ioffe.ru

² Б. Ц. Манжиков Институт физики и механики горных пород НАН КР, г. Бишкек

Концентрационный критерий разрушения твердых тел, развитый в ФТИ, подтвержден для лабораторных образцов, полимеров, металлов, композитов, природных материалов. Представляет большой интерес проверить его применимость для более крупных масштабов, в частности для массивов горных пород, для которых стоит проблема прогнозирования катастрофических ситуаций.

Для удароопасного глубокого рудника в г. Североуральск была создана сейсмологическая служба, которая в течение более 20 лет накапливала базу данных сейсмических событий. В данной работе был проведен анализ этой базы данных с позиций концентрационного критерия формирования очага разрушения. Удалось показать, что и для таких сложных условий как рудник концентрационный критерий позволяет выявить опасную очаговую и предсказать мощный горный удар.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект N 07-05-00542).

ФЦП 2009-1.1-151-066-017

ВВЕДЕНИЕ

Для настоящего этапа развития наших знаний о природе разрушения твердых тел и, в частности, горных пород характерен кинетический подход к проблеме прочности,

основоположником которого являлся С.Н.Журков [1]. Основу кинетических представлений составили многочисленные экспериментальные результаты, полученные для широкого круга материалов искусственного и естественного происхождения, включая полимеры, металлы, горные породы. С общих позиций рассматривалась эволюция разрушения, начиная с накопления изолированных дефектов структуры, их укрупнения, образования очага и, заканчивая макроразрушением-разделением тела на части.

Важным следствием кинетического подхода к процессу разрушения твердых тел стало выявление концентрационного механизма укрупнения трещин и количественная формулировка его критерия, известного как концентрационный критерий разрушения [2]. Концентрационная модель разрушения описывает условия перехода процесса разрушения с одного иерархического уровня на следующий, более высокий, при достижении критической концентрации дефектов в нагруженном объеме. Концентрационный механизм развития разрушения выполняется как для начальных дефектов, так и для их ассоциаций сколь угодно высокого уровня [3] от лабораторных образцов, до литосферных плит [4].

Представление явления разрушения как многоэтапного, пространственно-временного процесса накопления и развития нарушений сплошности материала составляет основу кинетической точки зрения, позволяющей обосновать принципиальную возможность его прогноза.

Динамические проявления разрушения в массиве горных пород, вызванные его разработкой, являются частным случаем индуцированной сейсмичности. При этом сейсмические явления, сопровождающиеся нарушением горных выработок, классифицируются как горные удары [5].

В настоящее время ни одна из задач прогноза горных ударов, связанная с предсказанием места, энергии и момента их возникновения не может считаться до конца решенной. Такое положение объясняется, прежде всего, недостатком физических представлений о природе и особенностях развития процесса разрушения в такой сложной среде, каковой является массив горных пород. Ситуация усугубляется тем, что большинство применяемых в настоящее время способов прогноза горных ударов направлено на определение степени удароопасности локальных участков массива, прилегающих к горным выработкам, и не позволяет контролировать состояние удароопасных областей в глубине массива. Широкое же внедрение в практику региональных методов контроля, в частности,

сейсмического, сдерживается недостаточным аппаратным и методическим обеспечением. Этим определяется актуальность исследований индуцированной сейсмичности шахтных полей с целью развития эффективных методов прогноза и профилактики горных ударов.

В настоящее время для описания различных форм динамических проявлений горного давления, включая горные удары, в основном, используются механические модели и критерии оценки удароопасности. В сейсмологических исследованиях ведущая роль отводится процессам трещинообразования. Особенно плодотворными представляются идеи автомодельности и самоорганизации геофизической среды, получившие развитие в последнее время [6].

К настоящему времени сейсмологами накоплены сведения о многочисленных предвестниках землетрясений, которые определяются как аномальное поведение геофизических полей в период, предшествующий землетрясению. Возмущения этих полей охватывают определенную область в окрестности гипоцентра будущего землетрясения, т.е. локализуются вблизи очага в пространстве и во времени. Локальность возмущений свидетельствует о возникновении в энергонасыщенной деформирующейся среде некоторой неоднородности-включения на фоне ее исходного состояния. С этой точки зрения, землетрясение это процесс возникновения, развития и распада неоднородности. Локальность процессов, связанных с дискретным актом разрушения в земной коре, послужили толчком для создания консолидационной модели подготовки тектонического землетрясения, ключевым моментом которой является представление о жесткой неоднородности [7].

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим с этих позиций закономерности индуцированной сейсмичности Североуральского бокситового рудника (СУБР), для которого характерна высокая степень удароопасности и повышенный уровень индуцированной сейсмичности. Здесь в течение длительного времени проводятся систематические работы по контролю и профилактике динамических проявлений горного давления и накоплен значительный объем данных по напряженному состоянию и индуцированной сейсмичности, являющихся уникальной базой данных для научных исследований [8]. По этой причине СУБР был выбран в качестве объекта настоящих исследований.

Информационной базой исследований являлся каталог сейсмических событий зарегистрированных сейсмостанцией «Североуральск» в период с 01.01.84 г. по 20.02.91 г. Анализируемый каталог содержал сведения о более 7000 сейсмических событий. Структура каталога горных ударов СУБРа соответствовала принятой в сейсмологии. Каждое зарегистрированное событие было представлено датой (год, месяц, число), временем по Гринвичу (часы, минуты), относительными координатами X,Y,Z гипоцентра, величиной сейсмической энергии.

Для естественной и индуцированной сейсмичности характерна большая неоднородность распределения в пространстве, наряду с отдельными локальными скоплениями эпицентров сейсмических событий, на большей части территории они могут быть относительно редки или отсутствовать вовсе. Скопления эпицентров приурочены к активным очагам разрушения и требуют повышенного внимания, как

наиболее вероятные места возникновения сильных горных ударов. Распределение эпицентров сейсмических событий, зарегистрированных на одном из участков показано на рис.1. Диаметр кружка пропорционален величине энергии сейсмического события:

$$lgr = 0,333lgW - 0,4, \quad (1)$$

где r -длина разрыва в метрах, W -сейсмическая энергия события.

Согласно консолидационной модели землетрясения и концентрационной (двустадийной) схеме разрушения, с момента образования неоднородности, в ее объеме протекают два противоположных по своей физической сущности процесса. Один, консолидационный, в результате которого происходит уплотнение среды, которая становится более жесткой, другой, трещинообразование, результатом которого является её разуплотнение. По мере уплотнения материала, в объеме жесткой неоднородности возрастают упругие напряжения, что, в свою очередь, вызывает интенсивное образование трещин, сдвигов и других дефектов структуры. В результате первого процесса увеличивается объем неоднородности – второй, напротив, препятствует ее росту. Вначале преобладает конструктивный процесс консолидации блочной среды, однако с некоторого момента в суммарном эффекте начинает преобладать трещинообразование. С этого момента начинается фаза распада неоднородности.

Выявить характерные стадии или фазы развития неоднородности, имея ввиду прогноз разрушения, можно, контролируя изменение размеров неоднородности и концентрационные характеристики трещинообразования [9].

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Для некоторой реализации процесса, представленной выборкой, содержащей n событий, по пространственным координатам гипоцентров событий можно вычислить сейсмоактивный объем нагруженной среды, в котором произошли эти события. Очевидно, он будет иметь некоторое значение, характерное для фоновой сейсмичности, которое будет изменяться в процессе эволюции неоднородности, при подготовке отдельного акта макроразрушения. Будем интересоваться средними значениями этого объема \bar{V} , рассчитанного по величинам средних пространственных интервалов между событиями выборки отдельно по координатам X, Y, Z , полагая, что он пропорционален объему неоднородности. Под пространственным интервалом понимается расстояние между гипоцентрами хронологически последовательных сейсмических событий.

$$\bar{V} = \overline{\Delta x \Delta y \Delta z},$$

где $\overline{\Delta x}, \overline{\Delta y}, \overline{\Delta z}$ - средние величины пространственных интервалов.

С учетом временного интервала между событиями величина четырехмерного объема для событий i -той выборки, равна

$$\bar{V}_4 = \overline{\Delta x \Delta y \Delta z \Delta t},$$

В соответствии с концентрационной моделью разрушения, будем рассматривать объемную концентрацию трещин

$$C = n / \bar{V}.$$

Соответственно, концентрация событий в четырехмерном объеме пространства-времени

$$C_4 = n / \bar{V}_4 = C / \overline{\Delta t}$$

Как видно из последней формулы, C_4 имеет смысл скорости изменения объемной концентрации C .

Концентрационный параметр K_p , примем равным отношению среднего расстояния между трещинами \bar{d} в выборке к их среднему размеру \bar{r}

$$K_p = \bar{d} / \bar{r}$$

Поскольку первые четыре величины, рассмотренные выше, являются попарно связанными, в дальнейшем будем рассматривать только две из них, пространственную концентрацию событий, скорость ее изменения, а также величину концентрационного параметра.

Наряду с перечисленными величинами, будем анализировать также средний размер образующихся трещин, рассчитанный по формуле (1), и угловой коэффициент графика повторяемости сейсмических событий. Энергетический спектр сейсмических событий, представленный в двойных логарифмических координатах или, так называемый, график повторяемости землетрясений - одна из важнейших характеристик в сейсмологии

$$\lg N = A - \gamma \cdot \lg W$$

где N - число событий с энергией W .

Эта зависимость имеет универсальный характер и выполняется в широком диапазоне энергий дискретных актов разрушения, включающего процессы трещинообразования, горные удары и землетрясения.

Величина углового коэффициента γ зависит от свойств среды и закона деформирования, при котором реализуется разрушение. Вариациям коэффициента γ придается предвестниковый смысл. Перечисленные характеристик индуцированной сейсмичности, достаточно полно отражают ее пространственно-временные особенности и режим.

Прогноз таких сложных явлений как горный удар и землетрясение должен базироваться на модели явления, от выбора которой во многом зависит успех решения проблемы. Модель должна быть достаточно простой, чтобы обеспечить реальную возможность решения и вместе с тем должна обладать необходимой детальностью, чтобы

сохранить основные существенные черты и связи явления. Наиболее полно этим требованиям в настоящее время удовлетворяет консолидационная модель, описывающая землетрясения как процесс возникновения и эволюции жесткой неоднородности, включения на фоне исходного состояния деформирующейся, блочной среды.

Согласно этой модели, жесткая неоднородность, возникшая в деформирующейся среде, в процессе своей эволюции претерпевает характерные изменения объема. Максимальных размеров включение достигает перед началом своего распада, который развивается по концентрационной схеме. Процесс разрушения происходит путем последовательного перехода трещинообразования с одного масштабного уровня на следующий после достижения в нагруженном объеме некоторой предельной концентрации дефектов предыдущего иерархического структурного уровня. При этом значение концентрационного параметра, численно равного отношению среднего расстояния между разрывами к средней длине разрывов, принимает минимальные значения.

Таким образом, физической предпосылкой для прогнозирования горных ударов, землетрясений могут служить кинетическая природа прочности, и наличие пространственно-временных предвестниковых аномалий геофизических полей, локализующихся в очаговой области. Причины локализации этих явлений раскрываются консолидационной моделью землетрясения, которая в основных чертах оказывается справедливой и для горных ударов.

Как можно видеть из рисунков 2 и 3, прогностические параметры испытывают характерные изменения, приуроченные к моментам возникновения энергетически сильных событий, имеющие очевидный прогностический смысл. Это обстоятельство позволяет рассматривать полученные результаты в качестве экспериментального доказательства применимости исходных модельных представлений к описанию индуцированной сейсмичности СУБРа.

Исходя из полученных экспериментальных результатов, можно представить некоторую обобщенную схему возникновения сильного горного удара, в основу которой положена консолидационная модель жесткого включения. На рис.4 показаны обобщенные зависимости скорости деформирования $\dot{\epsilon}$ породного массива, объема неоднородности V , концентрации дефектов C , концентрационного параметра K и активности индуцированной сейсмичности \dot{N} .

Предположим, что в момент времени t_1 в каком-то месте непрерывно деформирующегося массива, возникло затруднение процесса деформации, например, из-за наличия достаточно прочного выступа на бортах активного разлома. Это затруднение вызовет снижение скорости деформирования и рост напряжений в этом месте массива, вокруг которого среда уплотняется, и становится более жесткой. Возмущение напряженно-деформированного состояния среды, с течением времени, будет увеличиваться в объеме. Вместе с возрастанием напряжений в пределах возникшей неоднородности активизируются процессы трещинообразования, которые препятствуют быстрому росту напряжений и, тем самым, ограничивают увеличение объема самой неоднородности. В следующий момент времени t_2 , когда уплотнение неоднородности за счет роста напряжений и ее разуплотнение вследствие трещинообразования компенсируют друг друга, неоднородность перестает увеличиваться в объеме. С этого момента начинается преобладание процесса разуплотнения и распад неоднородности, прежде всего, вследствие активного укрупнения трещин, что влечет за собой увеличение скорости деформирования и спад напряжений в объеме неоднородности. Наиболее интенсивно укрупнение трещин происходит вдоль трассы будущего макроразрушения. В момент времени t_3 скорость деформации здесь резко увеличивается, происходит основной толчок и скачкообразный рост деформаций. При достаточно интенсивной подвижке, в некоторой ее окрестности могут возникнуть напряжения обратного знака, что вызывает изменение направления деформирования на противоположное. Скачок деформаций и перераспределение напряжений в области подвижки инициируют дальнейшую активизацию процесса укрупнения трещин в окружающем объеме, который содержит их высокую концентрацию и хорошо подготовлен к развитию разрушения. Количество образующихся дефектов к моменту t_4 достигает максимума. С этого момента

начинается восстановление физических характеристик и, к моменту t_5 среда возвращается в регулярное состояние.

Таким образом, в эволюции жесткого включения можно выделить три характерные фазы: фазу образования неоднородности или консолидации (t_1-t_2), фазу распада (t_2-t_3), которая включает акт магистрального разрыва (t_3-t_4), и период восстановления свойств или фазу постразрушения (t_4-t_5). Процесс разрушения твердых тел имеет стохастическую природу. Поэтому предсказать будущий макроразрыв можно лишь в вероятностном смысле,

но отнюдь, не детерминировано. Соответственно, и задача прогнозирования, в таком случае, должна решаться в вероятностной постановке.

В подобной постановке нас интересует, произойдет или не произойдет прогнозируемое событие и, если оно произойдет, то с какой вероятностью? В таком случае, относительно прогнозируемого события, могут быть выдвинуты две несовместные гипотезы H_1 и H_2 , образующие полную группу:

$$H_1 = \{\text{событие произойдет}\}$$

$$H_2 = \{\text{событие не произойдет}\}$$

Безусловная априорная вероятность возникновения значащего события $P(H_1)$ может быть определена из ретроспективного анализа сейсмических данных. Безусловная вероятность отсутствия значащего события равна

$$P(H_2) = 1 - P(H_1). \quad (12)$$

Источником информации о состоянии объекта наблюдений, в нашем случае является комплекс из 5 прогностических параметров, имеющих условные вероятности обнаружения значащего события $P(K_i/H_1)$.

Условные вероятности определяются, также ретроспективно, из следующих соображений. В реальном сейсмическом режиме и, в частности, в режиме индуцированной сейсмичности шахтных полей, в прогностическом смысле можно выделить четыре типа качественно отличных ситуаций:

1. Наблюдаются предвестниковые аномалии физических полей и, происходит значащее (прогнозируемое) событие, энергия которого превысила выбранный энергетический порог прогнозирования. В этом случае возможно обнаружение события и его прогноз.
2. Отсутствуют аномальные явления, но, несмотря на это, происходит значащее событие. В этом случае, тревога не может быть объявлена заблаговременно и прогноз события не возможен. Подобный случай классифицируется как «пропуск цели».
3. Наблюдаются предвестниковые аномалии сейсмического режима, но значащее событие не происходит. Этот случай может рассматриваться как случай неудачного прогноза или ложной тревоги.

4. Отсутствуют аномальные явления и, не происходит значащих событий. Этот случай соответствует фоновому режиму сейсмичности и не представляет интереса в прогностическом смысле.

В соответствии с первыми тремя случаями, эффективность прогностических параметров можно оценивать тремя величинами, связанных с количеством обнаружений, пропусков целей и ложных тревог. Обозначим их как: $P(K_i/H_1)$, $P(K_i/H_2)$, $P(K_i/H_3)$ и примем равными соответствующим вероятностям. Оценки этих величин должны производиться за достаточно продолжительный период времени, в течение которого имеет место необходимое число перечисленных ситуаций, чтобы прогнозирование могло считаться значащим.

Обозначим через l -число удачных прогнозов или обнаружений, m -число неудачных прогнозов или ложных тревог, n -число нераспознанных событий или пропусков цели. Тогда вероятность обнаружения по i -тому прогностическому признаку равна

$$P(K_i/H_1) = l/(l+n), \quad (13)$$

вероятность пропуска цели

$$P(K_i/H_2) = 1 - P(K_i/H_1), \quad (14)$$

вероятность ложной тревоги

$$P(K_i/H_3) = m/(l+m). \quad (15)$$

С учетом условных вероятностей по каждому прогностическому признаку задача прогноза формулируется следующим образом. Спрашивается, как нужно пересмотреть априорные вероятности гипотез при наличии информации по комплексу прогностических признаков, т.е. найти апостериорные или условные вероятности гипотез с учетом этой информации.

Решение может быть получено с помощью формулы Байеса, позволяющей пересчитывать априорные вероятности гипотез в свете новой информации, состоящей в том, что опыт дал некоторый результат A . В данном случае, A зависит от того имеет или не имеет место предвестниковая аномалия по i -тому прогностическому признаку

$$P(H_1 / K) = \frac{P(H_1) \prod_{i=1}^n P(K_i / H_1)}{P(H_1) \prod_{i=1}^n P(K_i / H_1) + P(H_2) \prod_{i=1}^n P(K_i / H_2)} . \quad (16)$$

Для того чтобы рассчитать по формуле Байеса апостериорные вероятности выдвинутых гипотез H_1 и H_2 , при наличии комплекса прогностических признаков, должны быть известны безусловные априорные вероятности гипотез $P(H_1)$, $P(H_2)$, условные вероятности обнаружения $P(K_i/H_1)$ и не обнаружения $P(K_i/H_2)$ прогнозируемых событий по каждому признаку. Эти вероятности, определенные ретроспективно по данным сейсмического контроля для событий 6-8 энергетических классов, приведены в таблице.

На практике, величина апостериорной вероятности событий должна рассчитываться в реальном времени для текущей реализации процесса. В том случае, если она превысит некоторый, наперед заданный пороговый уровень, отделяющий неопасное состояние объекта от опасного, может быть объявлена тревога или приняты соответствующие мероприятия по уменьшению опасности.

Для формализации процедуры временного прогнозирования горных ударов был разработан специальный алгоритм, основанный на данном подходе.. Проверка разработанной процедуры прогнозирования, проведенная в ходе ретроспективного прогноза горных ударов СУБРа, начиная с 6 энергетического класса, показала ее высокую эффективность.

Оценку максимально возможной энергии горного удара можно получить с помощью зависимости обратного накопления числа сейсмических событий от энергии. Эти зависимости получаются путем суммирования числа сейсмических событий по энергии, но не в обычном порядке, как это принято, например, при построении функции распределения, а в обратном, начиная с наибольших значений энергий.

Приблизительные оценки сейсмической энергии единичного акта разрушения, можно получить, экстраполируя график зависимости логарифма накопления событий от энергетического класса до пересечения с осью абсцисс, рис.6. Как видно из построений, максимально возможные значения энергий для событий на шахте N14-14 бис не превышают $10^{6.5}$ Дж, для шахты N15-15 бис $10^{8.7}$ Дж. Полученные оценки соответствуют значениям

сейсмической энергии, реально зарегистрированных здесь наиболее сильных сейсмических событий.

Концентрационный механизм разрушения допускает также достаточно простой способ пространственного прогноза горных ударов. Действительно, согласно этим представлениям, благоприятные условия для возникновения укрупненного разрыва сплошности создаются в местах с повышенной концентрацией трещин. Это позволяет прогнозировать наиболее вероятные места макроразрывов, измеряя объемную плотность трещин в контролируемой области. Чтобы выявить места наибольшего скопления трещин, поступим следующим образом. Будем рассматривать сумму расстояний между каждым событием текущей выборки относительно всех остальных. Наибольшая концентрация трещин оказывается вблизи того события, которому соответствует наименьшая сумма расстояний. Координаты этого события наиболее близки к центру самой насыщенной трещинами области массива для данной реализации процесса, т.е. дают искомую оценку наиболее вероятного места горного удара. Абсолютная погрешность определения мест горных ударов 6-8 классов предлагаемым методом при ретроспективном прогнозе составила 150 метров, относительная погрешность 0,25.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Таким образом, исходя из концентрационных представлений о разрушении твердых тел и консолидационной модели землетрясения, обоснован комплекс информативных прогностических характеристик подготовки горных ударов. Он включает: концентрационный параметр, равный отношению среднего расстояния между гипоцентрами событий к среднему размеру образующихся разрывов, объемную концентрацию сейсмических событий, скорость изменения концентрации, средний размер разрывов сплошности и величину углового коэффициента графика повторяемости. Предложенные характеристики обладают необходимой чувствительностью к появлению предвестниковой аномалии и хорошей воспроизводимостью прогностических признаков:

С использованием предложенного комплекса прогностических признаков разработан математически формализованный, вероятностный метод временного прогноза горных ударов, основанный на формуле Байеса.

Разработан метод прогнозирования максимально возможной энергии горных ударов и получены ее количественные оценки для шахтных полей СУБРа.

Разработан математически формализованный метод прогнозирования вероятных мест возникновения горных ударов.

Следует также отметить, что концентрационный критерий макроскопического разрушения был вначале предложен для лабораторных образцов, достаточно однородных и для режимов нагружения, обеспечивающих равномерное распределение механических напряжений [3]. Для таких условий действительно достаточно хорошо оправдывается двухстадийная модель разрушения и прогнозирование макроскопического разрушения не вызывает сложности. То, что эти же критерии позволяют прогнозировать горные удары и землетрясения позволяют считать эту модель достаточно универсальной.