

УДК 550.34

ГОРНЫЙ УДАР – ПРИЧИНА ВЫБРОСА МЕТАНА В УГОЛЬНОЙ ШАХТЕ?

В.В.Кузнецов

Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,
684034, Камчатский край, п. Паратунка, ул. Мирная, 7

E-mail: vvkuz38@mail.ru

Предложена модель, в которой горный удар (техногенное землетрясение) – представлен как выход ударной волны на внутреннюю стенку шахты. При этом возникает волна разгрузки, растяжения,двигающаяся в обратном (вглубь стенки) направлении. Ударная волна сопровождается движением среды в направлении распространения ударной волны со скоростью значительно меньшей, чем у волны. Совокупность явлений, происходящих на внутренней поверхности шахты, приводит к выбросу угольной пыли и растворенного в угле метана, что является причиной взрыва.

*Ключевые слова: горный удар, выход ударной волны на поверхность, волна раз-
режения, выброс угольной пыли и метана, электрический разряд и взрыв*

© Кузнецов В.В., 2015

MSC 86A25

ROCK BURSTS – THE CAUSE OF METHANE EMISSIONS IN THE COAL MINE?

V.V. Kuznetsov

Institute of Cosmophysical Researches and Radio Wave Propagation Far-Eastern Branch,
Russian Academy of Sciences, 684034, Kamchatskiy Kray, Paratunka, Mirnaya st., 7,
Russia

E-mail: vvkuz38@mail.ru

The model, which hit a mountain (technogenic earthquakes) - is presented as a way out of the shock wave at the inner wall of the shaft. This raises the unloading wave, stretching, moving backward (deep wall) direction. Shock wave accompanied by the movement of the medium in the propagation direction of the shock waves at a speed considerably less than that of the wave. The totality of phenomena occurring on the inner surface of the mine, leads to the release of coal dust and methane dissolved in the coal, which is the cause of the explosion.

*Key words: mountain pass, the shock wave to the surface, expansion wave, the
emission of methane and coal dust, electric shock and explosion*

© Kuznetsov V.V., 2015

Введение

Горный удар рассматривается как техногенное землетрясение, в рамках разрабатываемой автором ударно-волновой модели землетрясения. Обсуждаются возможные последствия горного удара, такие как быстрый выброс метана и угольной пыли с последующими взрывами компонент. Эти явления происходят в результате выхода ударной волны на поверхность угольного пласта. Ударная волна образуется в горной породе как реакция среды на нарушение литостатического равновесия за счет разрушения её целостности при проходке шахты, т.е. за счет возникновения горного давления.

На одной из крупнейших в мире угольной шахте «Распадская» на юге Кузбасса произошли взрывы в ночь на 9 мая 2010 года с интервалом в четыре часа, причем, второй взрыв был значительно сильнее первого и произошел в тот момент, когда в шахту уже спустились горноспасатели. Погибли люди. Причиной взрывов принято считать выбросы метана, угольной пыли и неосторожное обращение с огнем. Может ли горный удар (техногенное землетрясение) быть причиной этой трагедии? Для того чтобы ответить на этот вопрос, приведем некоторую информацию о горном ударе.

На североуральском месторождении бокситов ежегодно регистрируется около 3 тысяч горных ударов (ГУ). На СУБРе действует служба мониторинга и предупреждения ГУ – локальных подземных землетрясений со смещением горных пород. Мощный ГУ произошедший на этой шахте 13 февраля 2010 был воспринят сейсмологами как землетрясение (<http://echo.msk.ru/news/656402-echo.phtml>). Геофизическая служба РАН присвоила этому техногенному происшествию магнитуду 4,7. Геологическая служба США - 4,6. Возникает вопрос, может ли магнитуда (M) горного удара быть больше, например, 6 или 7 и, если нет, - то какая магнитуда ГУ может иметь максимальное значение?

Модель

Очаги землетрясений, ранжированные по магнитуде M , распределены упорядоченно не только по времени (закон Гуттенберга и Рихтера), но и в пространстве [1]. Как оказалось, среднестатистические расстояния d_M (км) между эпицентрами ближайших пар сейсмических очагов размерами L_M (км) и магнитуды M описываются соотношениями:

$$d_M = 10^{0.6M-1.94}; L_M = 10^{0.6M-2.5}.$$

Величина d_M фактически характеризует средний размер геоблоков, способных генерировать землетрясения магнитудой M . Коэффициент 0.6 при M свидетельствует об изменении размеров очагов L_M и соответствующих межэпицентральных расстояний d_M в 2 раза при каждом последовательном шаге в 0.5 единицы магнитуды. Величина d_M/L_M равна 3.63 и не зависит от магнитуды землетрясения. К примеру, для магнитуды $M = 3$, $d_M \approx 700$ м, а $L_M \approx 200$ (см. рис. 1).

Многочисленные наблюдения сейсмологов позволили выявить связь между магнитудой землетрясений и длиной разлома (тонкие линии на рис. 1). Для ГУ – длина разлома связана с размером шахты (геоблоком). Согласно [1], магнитуда $M = 4.7$ соответствует $L \approx 2.5$ км, а $d_M \approx 8$ км. Линейный размер очага техногенного землетрясения вполне мог достигать такой величины. Оценим максимально возможные величины L и d_M учитывая известные размеры этой шахты. Размеры шахтного по-

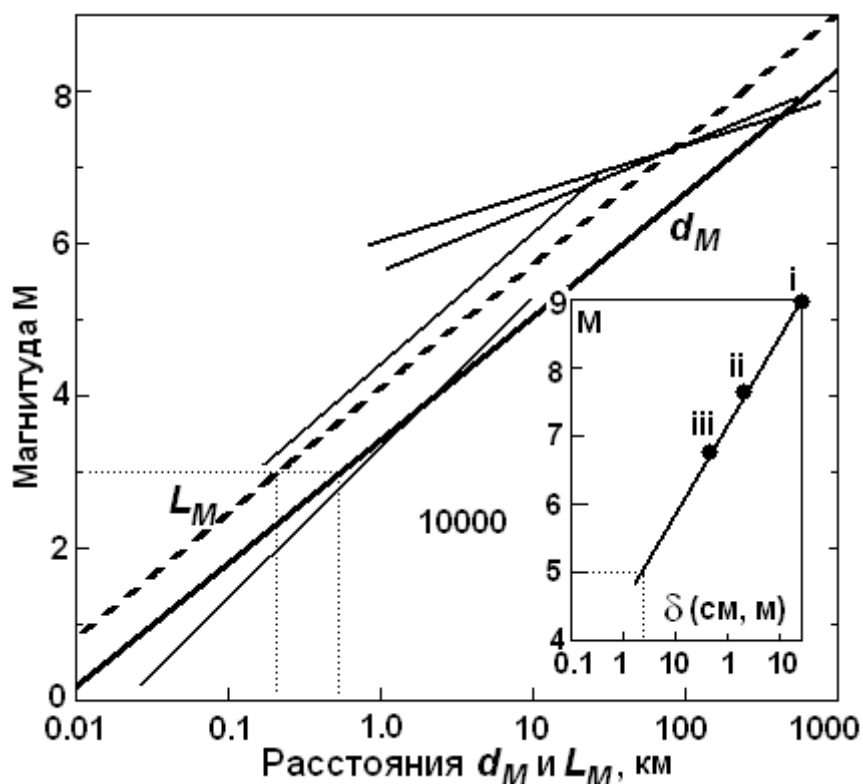


Рис. 1. Магнитуда землетрясения M – размер геоблока d_M , длина разлома L_M [1]. Тонкие линии – данные по длине разломов различных авторов. На врезке: зависимость M – δ . Точки показывают параметры землетрясений на Суматре (i), Алтае (ii) и в Калифорнии (iii).

ля шахты Распадская: по простиранию - 12,7 км, по падению - 4,3 км, площадь - 54,5 кв.км. (<http://premier.gov.ru/visits/ru/11167/info/11170/>). Естественно считать максимальный размер шахты – размером геоблока. Согласно рис. 1, при размере геоблока $d_M \approx 13$ км, максимальная магнитуда землетрясения может достигать $M = 5$, длина разлома при этом: $L_M = 3.8$ км. Это очень сильное землетрясение, напомним, что это максимально возможное его значение для шахты размером с Распадскую. Например, для землетрясения магнитудой $M = 6$, $L \approx 15$ км, а $d_M \approx 50 - 60$ км, что явно больше размеров среды, охваченной одной шахтой. В этом случае мы имеем дело уже с тектоническим землетрясением. Ещё один пример. Размер очага одного из самых сильных землетрясений, произошедших 26 декабря 2004 г. вблизи о. Суматра магнитудой $M = 9$, $L \approx 1000$ км.

Человечество более сотни лет пытается ответить на вопрос, что же такое землетрясение? Простого ответа на этот вопрос, как известно, - нет. По версии экспертов и читателей популярного журнала LiveScience, одна из десяти тайн Вселенной сформулирована так: «Что происходит в сердце землетрясения?». Этот вопрос не случаен, - ответа на него современная сейсмология не имеет, тем не менее, попытаемся ответить, понимая, конечно, что точного ответа пока никто не знает, а любая попытка сделать это - может быть только некоторым к нему приближением.

Автором предложена принципиально новая физика землетрясения, - т.н. ударно-волновая (УВ) модель [2], [3]. Явление землетрясения, согласно этой модели, - можно представить в виде трех последовательных стадий одного процесса: 1 – зарожде-

ние УВ в недрах Земли; 2 – транспортировка УВ от гипоцентра к поверхности Земли и 3 – выход УВ на поверхность Земли. При выходе УВ на поверхность образуется волна разгрузки (разрежения), которая, взаимодействуя с начальной УВ, приводит к генерации так называемых «сильных движений» (strong motion) на поверхности Земли, таких как: разрывы и отколы грунта, его разуплотнение, подъем и опускание уровня воды, колебания почвы подобные колебаниям жидкости, возникновение грифонов и т.п. Все эти процессы свойственны явлениям, возникающим при выходе УВ на поверхность твёрдого тела [4]. Особенностью УВ является то, что в отличие от акустических волн, за фронтом УВ происходит перенос вещества со скоростью, значительно меньшей, чем скорость УВ. Перенос вещества, хорошо изученный факт, получивший в сейсмологии название slip (скольжение, сдвиг, сброс), обычно интерпретируемый как фрикционное скольжение материала вдоль образовавшейся трещины, является следствием распространения УВ по твердому телу. В общепринятой в современной сейсмологии модели это явление получило название «выход на поверхность очага землетрясения». В принципе, такая трактовка применима и в нашей модели, только вместо выхода трещины (что само по себе не реально) понимаются процессы, сопровождающие выход на поверхность УВ.

Рассмотрим модель, в которой принимает участие не очень сильная ударная волна, такая, например, не может расплавить вещество среды, по которой распространяется и, тем более, его испарить [4]. Конечное состояние вещества после разгрузки предполагается твердым. При этом конечный объем разгруженного вещества V_x мало отличается от нормального объема твердого тела V_o . В то же время будем считать ударную волну и не слишком слабой, так, чтобы можно было пренебречь эффектами, связанными с прочностью твердого тела. Давление в теле, сжатом ударной волной, предполагаем изотропным, как в газе или жидкости. Это справедливо, когда давление велико по сравнению с пределом прочности, критическим напряжением сдвига и т. д. Скорость звука при этом определяется сжимаемостью вещества, модулем всестороннего сжатия, точно так же как в газе и жидкости.

Пусть по твердому телу распространяется плоская ударная волна постоянной амплитуды (давление, массовая скорость u , объем V , который лишь немного меньше нормального объема V_o). В определенный момент времени волна выходит на свободную поверхность, которую считаем параллельной поверхности фронта ударной волны. Не слишком сильная ударная волна, в которой сжатие мало, $V_1 - V \ll V_o$, не отличается от акустической волны сжатия и описывается формулами акустики. Она распространяется по телу со скоростью звука c_o . Давление в ней связано с массовой скоростью соотношением $p = \rho_o c_o u$ ($\rho_o = 1/V_o$). Начиная с момента $t = 0$ выхода ударной волны на свободную поверхность, по телу назад распространяется волна разгрузки, которая также является акустической. Она бежит по веществу со скоростью звука (мало отличающейся от скорости звука в нормальных условиях c_o). Давление в волне падает от начального p до нуля, а вещество приобретает скорость u' , связанную с изменением давления $\Delta p = -\rho_o c_o u'$ акустической формулой $u' = -\frac{\Delta p}{\rho_o c_o} = \frac{p}{\rho_o c_o}$ (рис. 2); плотность уменьшается немного: конечная плотность ρ мало отличается от нормальной плотности твердого тела: $(V_1 - V_o \ll V_o)$. Из сопоставления формул $p = \rho_o c_o u$ и $u' = p / \rho_o c_o$ видно, что дополнительная скорость, приобретаемая веществом при разгрузке u' , равна массовой скорости в ударной волне u , т. е. при выходе не слишком сильной ударной волны на свободную поверхность скорость вещества удваивается: $u_1 = u + u' \approx 2u$. Посмотрим, к каким эффектам может привести выход УВ на внутреннюю поверхность в шахте.

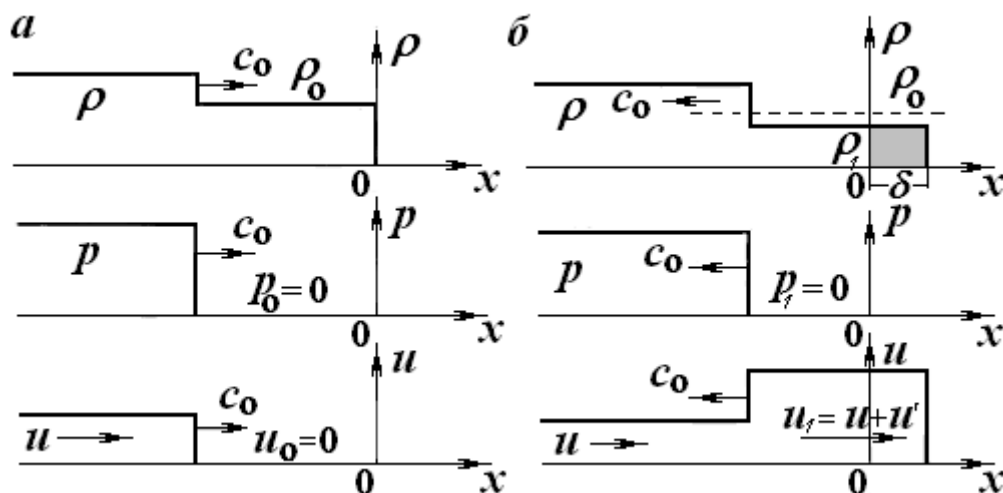


Рис. 2. Профили плотности, давления и скорости при выходе не сильной ударной волны на свободную поверхность. а) до момента выхода $t < 0$; б) после момента выхода $t > 0$ [4]. Выделенный серым цветом участок показывает, что на поверхности, после прохождения УВ, произошло разуплотнение среды, и сформировался слой толщиной δ с плотностью $\rho_1 < \rho_0$.

Известно, что в шахтах на глубине 300-600 м иногда наблюдаются так называемые динамические проявления горного давления в виде «стреляния» пород, толчков и горных ударов. «Стреляние» проявляется в отскакивании от напряженного массива отдельных кусков породы, сопровождающемся резким звуком. Толчок или горный удар внутреннего действия - это разрушение пород в глубине массива без выброса их в выработку. Внешние его проявления - резкий звук, сотрясение массива, осыпание породы с поверхности выработки, а при сильных толчках - воздушная волна. Как следует из сказанного выше, эти явления сопровождают выход ударной волны на «свободную» поверхность.

Приведем в качестве примера эффекты «стреляния» осколками внутренней стенки брони танка, образующимися после удара по внешней стороне брони подкалиберного снаряда. Эти эффекты хорошо известны и изучены: выброс осколков брони и поражение экипажа танка происходит при выходе ударной волны, образовавшейся после попадания в броню танка снаряда - на её внутреннюю поверхность. Подобные эффекты фиксируются и в момент землетрясений. «Стреляние» обычно происходит на скальном грунте. Если на поверхности земли осадочные водонасыщенные породы, то возникают грифоны - фонтаны воды, как это, например, происходило в момент Чуйского землетрясения на Алтае 2004 [3].

Оценим величину разуплотнения вещества - δ , образующегося после выхода УВ, из следующих соображений. По всей вероятности, она должна быть пропорциональна магнитуде землетрясения, предположим, что $\sim lg\delta$. Из наблюдений, выполненных на Чуйском землетрясении 2003, $M = 7.5$, $\delta = 100$ см, на Нортриджском землетрясении (Калифорния) 1994: $M = 6.7$, $\delta = 50$ см [2]. Для сравнения: при землетрясении на Суматре (2004) $M = 9$ разуплотнение достигало 20 м. Построим зависимость $\sim lg\delta$, для трех известных землетрясений (врезка на рис. 1), продолжая её в область меньших магнитуд, получим весьма приближенную оценку размера разуплотнения в шахте при ГУ $s = 5$: $\delta \approx 3$ см. Для оценки эффекта предположим, что плотность среды

после прохождения ГУ ρ составляет примерно 0.9 от ρ , (ρ примем равной 2 г/см^3), тогда $(\Delta\rho = 0.2 \text{ г/см}^3$. Рассчитаем количество вещества, выделившегося с поверхности шахты в 1 см^2 , или из объема, равного $1 \text{ см}^2 \times \delta = 3 \text{ см}^3$. Это примерно 0.6 – 0.8 г. Состав выброшенного вещества: метан + угольная пыль. Соотношение между этими компонентами известно: на тонну угля приходится 30 м^3 метана. Угля (угольной пыли) в нашем случае $\approx 1 \text{ г}$, метана $\approx 30 \text{ см}^3$. Взрывоопасная концентрация метана, как известно, 5%, это означает, что в объеме воздуха $= 600 \text{ см}^3$, может возникнуть взрыв. Так как мы соотносили наши оценки к площади поверхности каменного угля 1 см^2 , то опасная концентрация метана может возникнуть на расстоянии до 6 м от поверхности, на которую выходит ударная волна, без учета скорости диффузии метана в воздухе шахты.

Существенное влияние на взрыв угольной пыли оказывает присутствие метана. В отсутствие метана угольная пыль взрывается при содержании ее в воздухе не менее 30-40 г/м^3 , а при наличии CH_4 2 % опасная концентрация пыли понижается до 10 г/м^3 и при наличии метана 3 % эта концентрация еще понижается до 5 г/м^3 . Для предупреждения взрыва достаточно снизить концентрацию пыли до 5 г/м^3 , а с учетом запаса - до 1 г/м^3 . Т.о. можно считать, что опасная концентрация пыли будет составлять 10 г в 10^6 см^3 , или для площади в 1 см^2 , объем 1 г пыли должен содержаться в объеме 10^5 см^3 .

Не зная характера и скоростей перемешивания пыли в шахте, оценить время возникновения опасной для взрыва концентрации не представляется возможным. Тем не менее, оценить диапазон скоростей движения сплошной среды в момент выхода УВ на поверхность, - возможно. Опять воспользуемся данными по скорости движения среды в момент Нортриджского землетрясения 1994 г [2]. Уникальность этого землетрясения состоит в том, что основной удар его пришелся в район специализированного полигона, созданного для контроля т.н. «сильных движений». В эпицентре этого землетрясения измеренная скорость движения среды достигала $\approx 100 \text{ см/с}$. Магнитуда его больше, чем принятая нами для оценок $= 5$ на две единицы, следовательно, и скорость u' должна быть примерно в 100 раз меньше, и её можно считать равной 1 см/с . За время между двумя взрывами, равное примерно 10^4 с , частицы пройдут расстояние $l \approx 100$ метрам. Линейный размер (расстояние до стенки) объем взрыва будет не меньше 100 метров. Нам остается найти источник инициирования взрыва . . .

Из физики твердого тела известно, что при разрушении (измельчении) вещества, имеющего кристаллическую структуру и невысокую электропроводность, вновь образованные частицы приобретают электрические заряды обеих полярностей. Суммарный заряд частиц равен нулю, так как исходный материал электрически нейтрален. Весь уголь, поступивший в барабан мельницы после измельчения, разделяется на две равные части по массе, с одинаковыми электрическими зарядами по величине, но противоположными по знаку электричества. При отсутствии трибоэлектрических зарядов, заряды частиц, полученные в результате измельчения, никак себя не проявляют, результирующее электрическое поле любой совокупности частиц отсутствует. Если же знак заряда будет зависеть от размера частицы, а именно так и происходит с частицами пепла при извержении вулкана, то возможно разделение зарядов в движущемся потоке угольной пыли. Например, в облаке пепла выброшенного из вулкана, малые частицы пепла приобрели отрицательный заряд, а более тяжелые – положительный [5]. Очевидно, что тяжелые - обладают большим моментом и за «отведенное время» уходят дальше отрицательных. Возникшее электрическое напря-

жение, как следует из [5], достигает пробоя. Образование электрических разрядов в пепле вулкана [6], поднятой пыли во время мощных взрывов и при производстве муки - хорошо известно. Такая ситуация возможна и при выбросе смеси угольной пыли с метаном или чистого метана во время горного удара. Возникшая искра приводит к взрыву такой смеси. В модели мы рассмотрели два, следующих один за другим взрыва: сначала взрывается метан, а затем, после того, как пыль займет достаточно большой объем пространства шахты – произойдет взрыв угольной пыли. Возможен и другой вариант: первый взрыв – форшок, второй – основной удар. В принципе, это дело особенно не меняет.

Ударно-волновая модель землетрясения базируется на новых подходах в объяснении известных экспериментальных результатов, полученных при исследовании образцов горных пород при сжатии их на мощных прессах. Авторами ряда работ неоднократно наблюдалось явление самопроизвольного усиления интенсивности акустической эмиссии (АЭ), которое затем, так же самопроизвольно, - прекращалось (рис. 3а) [7].

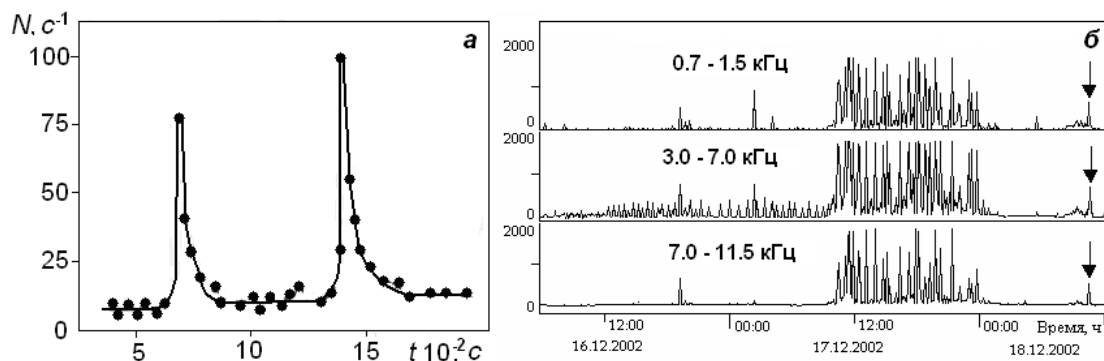


Рис. 3. а) Скорость образования трещин в диабазе при действии на образец постоянного одноосного сжимающего напряжения [7]; б) Геоакустические сигналы, зарегистрированные перед землетрясением 18.12.2002 ($K = 12.1$) на Камчатке (ИКИР). Время события отмечено стрелкой [8]

Автором [9] была сделана попытка найти объяснение этому явлению с точки зрения самоорганизации когерентной структуры на основе взаимодействия звуковых волн с раскрывающимися трещинами. Высказано предположение, что эффект усиления АЭ имеет некоторую общность с оптическим сверхизлучением [10]. Любопытный факт, досконально исследованный в некоторых работах в Японии и Китае, состоит в том, что эффекты акустического сверхизлучения происходят далеко не во всех типах горных пород [2]. Так, например, изучение режимов АЭ гранитов (гранодиоритов) двух различных типов: Oshima (fine-grained) и Inada (coarse-grained) показало, что образцы внешне практически не отличаются один от другого, при нагружении их на прессах, - ведут себя по-разному [11]. На серии образцов гранита из месторождения Oshima эффект резкого усиления интенсивности АЭ, названной нами акустическим сверхизлучением, постоянно присутствует, а на серии образцов гранитов другого типа Inada – эффекта нет. Этот результат, неоднократно подтвержденный экспериментально, дает основание полагать, что и в земных недрах должны встречаться геологические тела, реология которых такова, что в них могут развиваться процес-

сы самоорганизации и генерироваться, в конечном счете, землетрясение, а в других телах, на первый взгляд идентичных первым, таких явлений возникнуть не может.

Результаты многочисленных лабораторных экспериментов и натуральных наблюдений (рис. 3а) показывают, что на фоне постоянного акустического сигнала ($I = dN/dt \sim N$), излучаемого нагруженным образцом горной породы, возникает взрывоподобное нарастание (типа цепной реакции) количества раскрывающихся трещин N (акустических импульсов) в единицу времени t : $dN/dt \sim N^2$ [7]. Ясного понимания физики этого явления пока - нет.

Предположим, что в объеме среды находящейся под внешним давлением - возникает некоторое количество источников акустических импульсов. Это могут быть раскрывающиеся трещины, образующиеся дислокации, образование и разрушение водородных связей среды и пр. Каждая такая дислокация в определенных условиях излучает акустический импульс. Сумма таких импульсов составляет акустический фон N . Представим себе ситуацию, в которой такая дислокация связана не очень пока ясной связью с другими дислокациями таким образом, что она (эта дислокация) стимулирует излучение акустического импульса другими. Например, акустические волны, возникающие при разрушении N дислокаций, могут способствовать разрушению других, связанных (сцепленных, запутанных) с ними $(N - 1)$ дислокаций. В результате акустический фон возрастает с N импульсов в единицу времени до $N + N(N - 1) = N^2$. Подобные процессы в физике принято называть кооперативными, Принципиальным моментом в этой модели остается пока не ясной физика такой связи. Действительно, когда пытаешься объяснить акустическое сверхизлучение небольшого образца горной породы, то механизм, в котором раскрывающаяся трещина генерирует акустический импульс, который не очень ясным способом приводит к раскрытию других подготовленных микротрещин и все повторяется снова и снова, - представляется логичным. Здесь нет ограничения, вызванного конечной скоростью звука в образце. Но такой механизм не применим, если речь идет об очень больших расстояниях, соизмеримых с размером очага землетрясения.

В качестве примера, приведем запись акустических сигналов, полученных на Камчатке и имеющих непосредственную связь с готовящимся землетрясением. Высокочастотные акустические сигналы генерируются в непосредственной близости (не более одного - двух км) от приемника. Землетрясение происходит на глубине около 30 км и на расстоянии от приемника порядка 100 км. Тем не менее, приемник каким-то образом «чувствует» землетрясение: Незадолго до него акустический фон резко возрастает и так же резко прекращается. После чего следует временной интервал, называемый сейсмологами «сейсмическим затишьем» (рис. 3б) [8].

Возможно ли возникновение УВ в пласте угля? По-видимому – да, т.к. наблюдения за поведением куска антрацита при сдавливании его на прессе показывает точно такую же картину акустического сверхизлучения (рис. 4) [12], как в диабазе на рис. 3а.

Данные, показывающие очевидную связь между землетрясением и выбросом метана в принципе - известны, см. например, [13]. Однако сказать о том, что каждый взрыв на шахте обязан землетрясению (горному удару), - достаточных оснований пока нет. Дело в том, что в случае взрывов на шахте Распадская геофизическая служба СО РАН, обладающая разветвленной сетью сейсмостанций в районе взрывов, оценить магнитуды ни первого, ни второго взрывов, ввиду очень нечетких записей сейсмограмм, - не смогла.

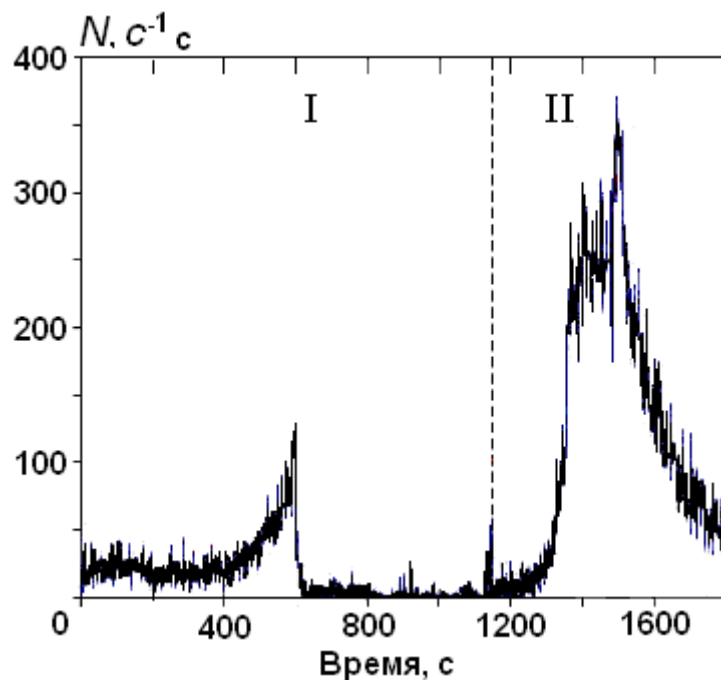


Рис. 4. Изменение во времени активности АЭ \dot{N} при одноосном деформировании угля во втором цикле (II) после трехосного осесимметричного сжатия в первом цикле (I) [12]

Заключение

Можно ли прогнозировать горный удар? Этот вопрос можно перефразировать так: можно ли прогнозировать землетрясение, его местоположение, время и силу? Пока на эти вопросы можно ответить только отрицательно. Имеются ли предпосылки к его решению? Похоже, что это так. Если сейсмически опасная область ведет себя так, как это показано на рис. 2б, т.е. после активизации акустической эмиссии наступает период сейсмического молчания (затишья), то в конце его следует удар. Если удастся понять физику этого явления, а предпосылки к этому, вроде, - имеются, то краткосрочный прогноз горного удара в шахте – возможен. Если удастся выяснить, связана ли длительность периода акустического молчания с магнитудой землетрясения, то тогда откроется возможность прогнозировать и силу горного удара. Конечно, шумная шахта, - не лучшее место для размещения акустических датчиков. Возможным решением этой проблемы может быть существенное различие в диапазонах частот источников: природных и техногенных.

Благодарю чл.-корр. РАН Г.И. Грицко за обсуждение этой работы и рекомендации, а также проф. Г.И. Кулакова за высказанные замечания.

Библиографический список

1. Уломов В.И. Сейсмогеодинамика и сейсмическое районирование северной Евразии // Вестник ОГГГН РАН. 1999. №. 1(7).
2. Кузнецов В.В. Введение в физику горячей Земли. Петропавловск-Камчатский: КГУ. 2008. 367 с.
3. Кузнецов В.В. Ударно-волновая модель землетрясения (I). Сильные движения землетрясения как выход ударной волны на поверхность // Физическая мезомеханика. 2009. Т. 12. №. 6. С. 87-96.

4. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966. 688 с.
5. Miura T., Koyaguchi T., Tanaka Y. Measurements of electric charge distribution in volcanic plumes at Sakurajima Volcano, Japan // Bull. Volkanol. 2002. V. 64. P. 75-93.
6. Адамчук Ю.В., Титов В.В. Электрические процессы и образование молний в вулканическом аэрозоле // препринт ИАЭ 4016/1, 1984.
7. Журков С.Н., Куксенко В. С., Петров В.А. и др. Концентрационный критерий объемного разрушения твердых тел // Физические процессы в очагах землетрясений: Сб. науч. тр. М.: Наука, 1980.
8. Купцов А.В. Особенности высокочастотной геоакустической эмиссии на заключительной стадии подготовки землетрясения: автореф. дис. канд. физ.-мат. наук. Камчатский край, с Паратунка. 2006. 23 с.
9. Кузнецов В.В. Модель самоорганизации ансамбля излучающих звук трещин // ПМТФ. 2001. Т. 42. №4. С. 184-189.
10. Dicke R.H. Coherence in spontaneous radiation processes // Phys. Rev. 1954. vol. 93. №1. P. 99-110.
11. Kusunose K, Lei X., Nishizawa O., Satoh T. Effect of grain size on fractal structure of acoustic emission hypocenter distribution in granitic rock // PEPI 1991. V. 67. №. 1-2. P. 194-199.
12. Кучурин С.В. Обоснование и разработка способов геоконтроля на основе закономерностей акустической эмиссии в образцах угля при механическом и термическом нагружении: автореф. канд. техн. наук. Москва. 2008. 20 с.
13. Li T., Cai M.F., Cai M. Earthquake-induced unusual gas emission in coalmines. A km-scale in-situ experimental investigation at Laohutai mine // Inter. J. of Coal Geology. 2007. vol. 71. №2-3. P. 209–224.

Поступила в редакцию / Original article submitted: 06.02.2015