

УДК 662.831:539.42

АНАЛИЗ СТАТИСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДАННЫХ
ГЕОАКУСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НА МЕСТОРОЖДЕНИИ “АНТЕЙ”

В. Л. Гиляров¹, Е. Е. Дамаскинская¹,
А. Г. Кадомцев¹, И. Ю. Рассказов²

¹Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН,
ул. Политехническая, 26, 194021, г. Санкт-Петербург, Россия

²Институт горного дела ДВО РАН,
бул. Уссурийский, 5, 680000, г. Хабаровск, Россия

Выполнен анализ результатов геоакустического мониторинга на месторождении Антей, опасном по горным ударам. Предложен подход к обработке и интерпретации экспериментальных данных, основанный на применении следующих статистических параметров: дисперсии вейвлет-коэффициентов энергии, корреляционной фрактальной размерности, распределения сигналов по энергиям. Сопоставление рассчитанных параметров с проявлением техногенной сейсмичности на руднике “Глубокий” показало их удовлетворительную корреляцию с результатами натуральных наблюдений, что дает основание рассматривать эти параметры в качестве возможных предвестников катастрофических событий.

Месторождение Антей, удароопасность, техногенная сейсмичность, разрушение, акустическая эмиссия, дисперсия вейвлет-коэффициентов, корреляционный интеграл, распределение по энергиям

Добыча полезных ископаемых и подземное строительство на больших глубинах сопряжено с необходимостью ведения горных работ в условиях повышенного горного давления, наиболее опасными формами которого являются внезапные выбросы породы и газа, горные и горно-тектонические удары, нередко приводящие к катастрофическим последствиям. Прогнозирование этих динамических явлений представляет собой весьма сложную научно-техническую проблему, решение которой требует применения эффективных методов и технических средств оценки и контроля геомеханического состояния массива горных пород.

Месторождение урановых руд Антей, расположенное в Стрельцовском рудном районе Юго-Восточного Забайкалья, — одно из наиболее удароопасных в Дальневосточном регионе [1]. Оно характеризуется сложными горно-геологическими и геомеханическими условиями. Практически все разновидности пород, особенно лейкократовые граниты, проявляют склонность к упругому деформированию и хрупкому разрушению в динамической форме. В массиве месторождения действует неравнокомпонентное поле напряжений, в котором преобладают горизонтальные сжимающие напряжения: наибольшие из них в 1.5–2.5 раза и более превышают гравитационную

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 13-05-00152а) и ДВО РАН (интеграционный проект № 12-II-CY-08-10).

составляющую от массы налегающей толщи пород. В настоящее время очистные работы на месторождении, разработку которого ведет рудник “Глубокий” ОАО “ППГХО”, достигли глубины 820 м (на XIII горизонте). На нижележащих горизонтах ведутся горно-подготовительные работы.

На месторождении Антей зарегистрирован весь спектр динамических проявлений горного давления, вплоть до сильных разрушительных горных ударов. В последние годы наблюдаются сейсмические события, проявляющиеся не только в подземных горных выработках, но и в поверхностном комплексе рудников.

С 2005 г. на месторождении эксплуатируется автоматизированная геоакустическая система контроля горного давления “Prognoz ADS”, которая позволяет регистрировать и определять параметры АЭ-событий в частотном диапазоне 0.5–12 кГц [2]. По результатам мониторинга формируется база данных, представляющая собой совокупность различных параметров сигналов акустической эмиссии (АЭ). Каждый сигнал АЭ характеризуется временем излучения, тремя координатами гипоцентра и энергией, приведенной к источнику АЭ-сигнала.

В настоящей работе представлены результаты анализа экспериментальных данных (АЭ-событий), зарегистрированных в период с 1.01.2010 по 31.01.2011. Общее число событий — 6835, энергетический диапазон от сотых долей до тысяч джоулей. В рассматриваемый период времени на руднике произошло шесть крупных акустических событий.

В процессе анализа важной задачей являлось получение статистических характеристик, способных служить предвестниками опасных геодинамических явлений. Согласно [3–5], таким свойством может обладать дисперсия коэффициентов вейвлет-преобразования амплитуд исследуемого временного ряда. Для практического применения этой величины может быть использована формула [3]

$$\sigma(j) = \left[\frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (w(j,k) - \langle w(j,k) \rangle)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

где j — масштабный коэффициент вейвлет-преобразования w ; k — пространственный коэффициент (задает положение вейвлета во времени).

Второе слагаемое в (1) представляет собой среднее значение по времени от вейвлет-преобразования и, как нетрудно показать, равно нулю в силу того, что анализирующий вейвлет имеет нулевое среднее значение.

При расчете дисперсии использовано как непрерывное, так и дискретное вейвлет-преобразование. В качестве анализирующих вейвлетов выбирались: для непрерывного вейвлет-преобразования — вейвлет “сомбреро”, для дискретного преобразования — Добеши-8. Весь временной ряд разбивался на интервалы, содержавшие 512 событий, на которых проводился расчет дисперсии по формуле (1). Затем начальный отсчет нового интервала смещался на 128 событий (для получения плавных зависимостей) и расчет повторялся. Время текущего интервала определялось по времени события его последней точки. Таким способом получалась временная зависимость дисперсии, приведенная на рис. 1, для непрерывного и дискретного вейвлет-преобразования. Различным кривым на рис. 1 соответствует различный масштабный фактор j в формуле (1).

Дисперсия практически не зависит от j , однако на больших масштабах зависимость дисперсии от масштаба существует. Также видны всплески дисперсии, чередующиеся с периодами затишья. Нанесенные на рис. 1 отметки шести крупных сейсмоакустических событий, произошедших в рассматриваемый период времени, соответствуют по времени всплескам дисперсии и показывают, что дисперсия вейвлет-коэффициентов действительно может служить признаком приближающегося динамического явления, сопровождающегося разрушением массива горных пород.

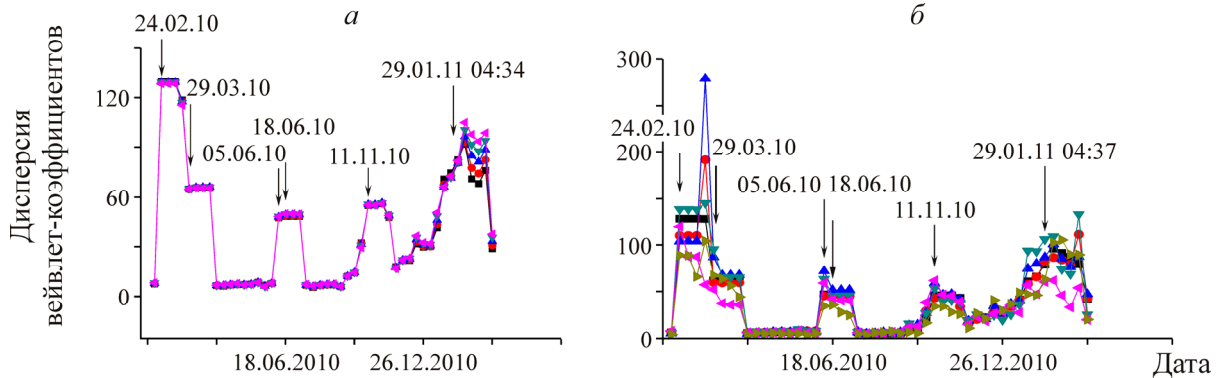


Рис. 1. Временная зависимость дисперсии первых пяти вейвлет-коэффициентов для непрерывного (а) и дискретного (б) вейвлет-преобразования

На рис. 2 приведена зависимость дисперсии от масштаба, построенная для данных, полученных в период с 01.01.2010 по 31.01.2011, в логарифмических координатах. Из графика следует, что слабая зависимость дисперсии на малых масштабах сменяется степенной зависимостью (с показателем ~ 1) на больших масштабах. Поскольку дисперсия вейвлет-коэффициентов равна сглаженному спектру “мощности” исходного сигнала, такая зависимость соответствует характерным степенным хвостам, отвечающим долговременным корреляциям в системе ($1/f$ шум).

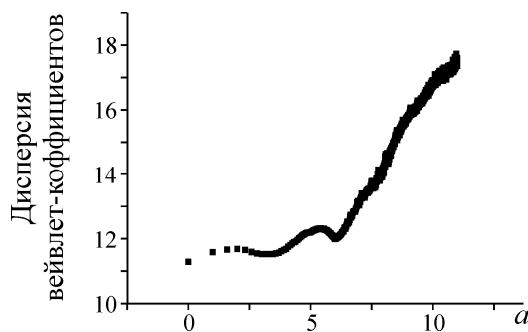


Рис. 2. Зависимость дисперсии вейвлет-коэффициентов от масштаба, построенная для данных, зарегистрированных на месторождении Антей с 01.01.2010 по 31.01.2011

Таким образом установлено, что крупные сейсмоакустические события сопровождаются всплесками дисперсии коэффициентов вейвлет-преобразования.

Изучена также временная зависимость корреляционной фрактальной размерности, рассчитанной из корреляционного интеграла вида

$$C(r) = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{j=1}^N \sum_{i=j+1}^N H(r-r_{ij}), \tag{2}$$

где r_{ij} — расстояние между парой акустических событий; N — число анализируемых событий; H — функция Хевисайда, равная единице, если ее аргумент неотрицателен, и равная нулю в противном случае.

Таким образом, функция (2) равна числу пар событий, расстояние между которыми не превосходит r . Если в системе присутствует масштабная инвариантность, то зависимость

$$C(r) \sim r^d \tag{3}$$

представляет собой степенную функцию с показателем степени, равным корреляционной фрактальной размерности системы.

Расчет показал, что соотношение (3) выполняется не всегда и не на всех масштабных уровнях. В частности, в период с 26.11.2010 по 18.12.2010 зависимость (2), построенная в логарифмических координатах, имеет излом, отделяющий малые масштабные уровни от больших (рис. 3). На малых масштабах $d \sim 2$, и это значение отвечает фрактальной размерности, наблюдаемой на всем изученном отрезке времени. Заметим, что значение $d \sim 2$ означает, что разрушение происходит не в объеме целика, а на некоем двумерном многообразии, что подтверждается прямым построением координат событий, происходивших в рассматриваемый период времени. Этот факт объясняется сложным строением данного участка массива пород, приуроченного к месту “пережима” и сопряжения двух тектонических нарушений [1].

Значительное уменьшение величины d , наблюдаемое на больших масштабах (рис. 3), свидетельствует об уменьшении роли крупномасштабных флуктуаций в этот период времени. Однако в дальнейшем на больших масштабах наблюдается рост величины d . В результате этого во всем диапазоне масштабов примерно к середине января 2011 г. сформировалась однородная фрактальная структура с размерностью $d \sim 2.2$, которая разрушилась 29.01.2011, причем фрактальная размерность при разрушении уменьшилась (рис. 4). Такой механизм разрушения более характерен для свободной поверхности материала, чем для его объема [5].

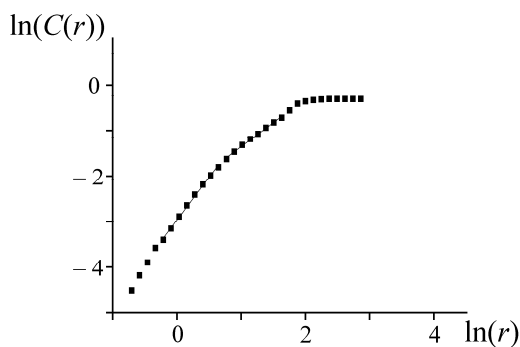


Рис. 3. Пример зависимости корреляционного интеграла от масштаба. На малых масштабах фрактальная размерность $d \approx 1.88$, на больших масштабах $d \sim 1.05$

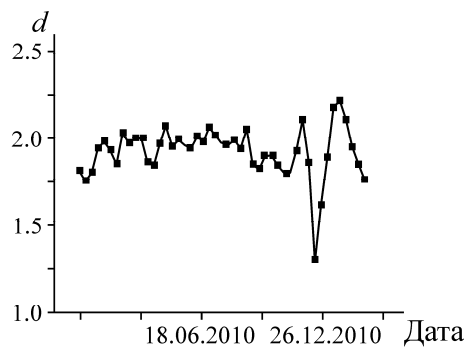


Рис. 4. Зависимость корреляционной фрактальной размерности от времени

Проведен также анализ энергетических распределений сигналов акустической эмиссии, возникающей при деформировании горных пород.

В сейсмологии общепринято, что распределение числа землетрясений по магнитуде (энергии) описывается степенной функцией [6–10] — закон Гутенберга–Рихтера. Распределения числа событий по энергии анализировались не только на больших масштабах разрушения (землетрясения, горные удары), но и в лабораторных экспериментах по деформированию образцов горных пород [9]. В этих работах основное внимание уделялось анализу изменения угла наклона графика повторяемости (b-value).

Однако при анализе экспериментов по деформированию образцов горных пород нами обнаружено, что распределение сигналов акустической эмиссии по энергии не всегда удается аппроксимировать степенной функцией. В связи с этим в данной работе проведен анализ функционального вида энергетических распределений АЭ-сигналов.

Распределения АЭ-сигналов по энергии строились не для всей совокупности данных, а для последовательных промежутков времени (по месяцам). Пример такого распределения для апреля 2010 г. показан на рис. 5а. Видно, что в полулогарифмических координатах данные аппроксимируются линейной функцией. Это означает, что распределение экспоненциальное. Об-

наружено, что с января по июнь 2010 г. распределения АЭ-сигналов по энергии имеют экспоненциальный вид. В июле и августе того же года энергетические распределения не удается однозначно аппроксимировать ни степенной, ни экспоненциальной функцией. Скорее всего, это означает, что в различных пространственных областях массива процесс дефектообразования имеет различный характер.

На рис. 5б показано распределение, полученное в октябре 2010 г. Аналогичный вид имеют энергетические распределения, полученные в период с сентября 2010 г. по январь 2011 г. Видно, что функциональный вид распределения изменился. Данные хорошо аппроксимируются линейной функцией в двойных логарифмических координатах, т. е. распределение является степенным.

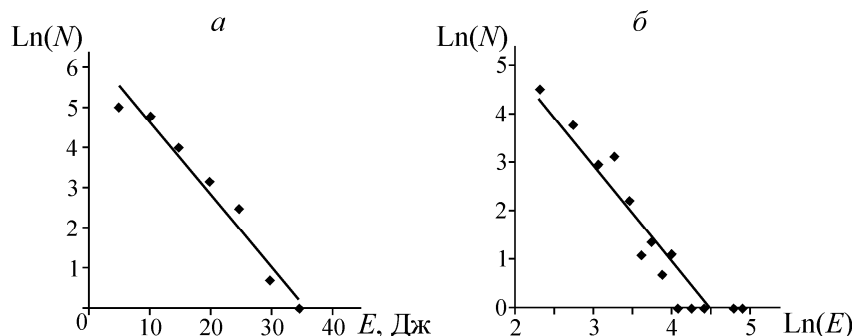


Рис. 5. Распределение АЭ-сигналов по энергии в апреле 2010 г. (а) и в октябре 2010 г. (б)

Итак, установлено, что в ряде случаев существует отклонение от закона Гутенберга–Рихтера — распределение по энергии не всегда степенное.

Были сопоставлены энергетические распределения с пространственным распределением этих же дефектов. Пространственные распределения дефектов, так же как и энергетические распределения АЭ-сигналов строились по месяцам.

Оказалось, что в начальный период наблюдений (с января по июнь 2010 г.) дефекты образуются хаотично (рис. 6а). Энергетическое распределение АЭ-сигналов, соответствующих этим дефектам, имеет экспоненциальный вид. Начиная с сентября 2010 г. в пространственном распределении дефектов отчетливо видна локализация (рис. 6б), соответствующие энергетические распределения аппроксимируются степенной функцией. Есть основания предполагать, что данная особенность указывает на переход системы (акустически активного участка массива горных пород) в опасное (неустойчивое) состояние самоорганизованной критичности [11], при котором возможно образование крупных дефектов, сопровождаемое выделением значительной энергии.

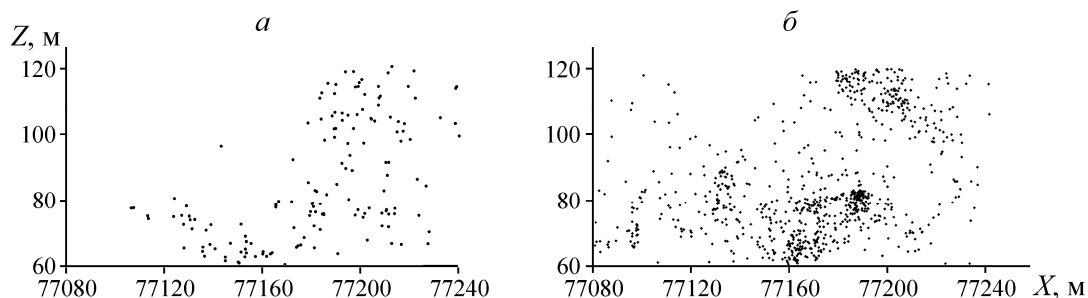


Рис. 6. Пространственный анализ разрушения горного массива. Проекция координат гипоцентров источников АЭ: а — дисперсное разрушение (апрель 2010 г.); б — локализованное разрушение (октябрь 2010 г.)

Таким образом, при анализе крупномасштабного разрушения массива горных пород обнаружено, что различному характеру накопления дефектов соответствует различный функциональный вид энергетического распределения АЭ-сигналов.

ВЫВОДЫ

Все три статистические характеристики экспериментальных данных позволили рассмотреть процесс формирования очага геодинамического явления 29.01.2011. При этом ни корреляционный интеграл, ни энергетическое распределение акустоэмиссионных сигналов не выявили явных признаков подготовки других крупных событий. И только временная зависимость дисперсии вейвлет-коэффициентов дала возможность определить начало и процесс формирования всех крупных динамических проявлений горного давления. Полученные результаты позволяют рассматривать временную зависимость дисперсии вейвлет-коэффициентов в качестве возможного предвестника катастрофических событий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рассказов И. Ю., Саксин Б. Г., Петров В. А., Просекин Б. А.** Геомеханические условия и особенности динамических проявлений горного давления на месторождении Антей // ФТПРПИ. — 2012. — № 3.
2. **Рассказов И. Ю., Гладырь А. В., Аникин П. А., Святецкий В. С., Просекин Б. А.** Развитие и модернизация системы контроля динамических проявлений горного давления на рудниках ОАО “ТПГХО” // Горн. журн. — 2013. — № 8 (2).
3. **Дьяконов В. П.** Вейвлеты. От теории к практике. — М.: Солон-Р, 2002.
4. **Thurner S., Feurstein M. C., Teich M. C.** Multiresolution wavelet-analysis of heartbeat intervals discriminates healthy patients from those with cardiac pathology, *Phys. Rev. Lett.*, 1988, № 7.
5. **Гиляров В. Л., Корсуков В. Е., Бутенко П. Н., Светлов В. Н.** Применение вейвлет-преобразования для изучения изменения фрактальных свойств поверхностей аморфных металлов под воздействием механической нагрузки // ФТТ. — 2004. — 46. — № 10.
6. **Соболев Г. А., Арора Б., Смирнов В. Б., Завьялов А. Д., Пономарев А. В., Кумар Н., Чабак С. К., Байдия П. Р.** Прогностические аномалии сейсмического режима. Ч. II. Западные Гималаи // Геофиз. исследования. — 2009. — Т. 10. — № 2.
7. **Gutenberg B., Richter C. F.** *Seismicity of the Earth and Associated Phenomena*, 2nd ed. Princeton, N.J.: Princeton University Press, 1954.
8. **Katsumata Kei.** Imaging the high b-value anomalies within the subducting Pacific plate in the Hokkaido corner, *E-LETTER Earth Planets Space*, 2006.
9. **Ponomarev A. V., Zavyalov A. D., Smirnov V. B., Lockner D. A.** Physical modeling of the formation and evolution of seismically active fault zones, *Tectonophysics*, 1997, Vol. 277.
10. **Schorlemmer D., Wiemer S., Wyss M.** Earthquake statistics at Parkfield: 1. Stationarity of b-values, *Journal of geophysical research*, 2004, Vol. 10, B12307, doi: 10.1029/2004JB003234.
11. **Bak P.** *How Nature Works*, NY, Springer-Verlag, 1996.

Поступила в редакцию 23/XII 2013