

УДК 622.831.1:539.375.5

Гиляров Владимир Леонович

доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник,
Физико-технический
институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021, г. Санкт-Петербург,
ул. Политехническая, 26
e-mail: Vladimir.Hilarov@mail.ioffe.ru

Дамаскинская Екатерина Евгеньевна

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник,
Физико-технический
институт им. А.Ф. Иоффе РАН

Рассказов Игорь Юрьевич

доктор технических наук,
директор Института горного дела ДВО РАН,
680000, г. Хабаровск, Россия,
ул. Тургенева, 51

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВРЕМЕННОГО
ИЗМЕНЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ РАЗРУШЕНИЯ
НА МЕСТОРОЖДЕНИИ «АНТЕЙ»****Аннотация:*

Изучено поведение во времени рекуррентных графиков (РГ) энергий для акустоэмиссионных (АЭ) событий и динамических характеристик этих графиков (таких как детерминизм, ламинарность, энтропия диагонали) в период с 1.01.2010 по 31.01.2011. Обнаруженное структурирование РГ и изменение рассмотренных динамических характеристик указывают на увеличение степени детерминированности процесса разрушения перед катастрофическими событиями.

Ключевые слова: разрушение материалов, нелинейная динамика, природные и техногенные катастрофы

DOI: 10.18454/2313-1586.2016.02.053

Hilyarov Vladimir L.

Doctor of physical
and mathematical sciences, senior researcher,
Physical and technical Institute
in honor of A.F. Ioffe RAS,
194021, St. Petersburg,
26 Polytechnicheskaya st.
e-mail: Vladimir.Hilarov@mail.ioffe.ru

Damaskinskaya Ekaterina E.

Candidate of physical
and mathematical sciences, senior researcher,
Physical and technical Institute
in honor of A.F. Ioffe RAS.

Rasskazov Igor Yu.

Doctor of technical sciences,
the director of the institute,
The Institute of mining FEB RAS,
680000, 51Turgenev st., Khabarovsk

**THE REGULARITIES OF DYNAMIC
BREAK-DOWN PARAMETERS
TEMPORAL VARIATION
IN THE "ANTEY" DEPOSIT***Abstract:*

Temporal behavior of recurrent plots (RP) on a time basis for acoustical and emission events and dynamic characteristics of these plots such as determinism, laminarity and diagonal lines entropy (RQA) are investigated during the time period since 1.01.2010 up to 31.1.2011. RP structuring as well as variations in RQA characteristics point to the increase of determinacy degree of break-down process before the natural and man-made catastrophic events.

Key words: material break-down, nonlinear dynamics, natural and man-made catastrophes

Методы нелинейной динамики все чаще применяются в настоящее время для анализа временных рядов различной физической природы с целью выявления в них динамических характеристик, таких как размерность вложения (определяющая число динамических параметров, необходимых для описания системы) и фрактальная размерность динамического аттрактора, если он существует. Для этого бывает достаточно знать временную зависимость одной единственной физической величины $x(t)$ и, на основании теоремы Такенса [1], построить лаговое m -мерное пространство (пространство вложения), эквивалентное фазовому пространству системы, в котором множество точек, принадлежащих исходному временному ряду, обладает топологическими свойствами аттрактора динамической системы. При этом для каждой точки временного ряда $x(t_i)$ строится m -мерный вектор $X_i(m)$ с координатами вида

* Работа выполнена при финансовой поддержке фонда РФФИ (грант №16-05-00237)

$$\mathbf{X}_i(m) = (x(t_i), x(t_i + \tau), \dots, x(t_i + (m-1)\tau)) \quad (1)$$

В то же время для восстановления фазового пространства динамической системы требуются временные ряды, содержащие очень большое количество отсчетов, особенно если динамическая система подвержена внешним шумам, поэтому далее используется методика, не требующая большого числа измерений.

В настоящей работе представлены результаты анализа экспериментальных данных (АЭ-событий), зарегистрированных автоматизированной геоакустической системой контроля горного давления «Prognoz ADS» в период с 1.01.2010 по 31.01.2011 на месторождении урановых руд Антей, расположенном в Стрельцовском рудном районе в юго-восточном Забайкалье [2]. Общее число событий – 6835; энергетический диапазон от сотых долей Дж до тысяч Дж. В рассматриваемый период времени на руднике произошло шесть крупных акустических событий. Для обработки экспериментальных данных был применен метод рекуррентных графиков и количественного рекуррентного анализа (recurrence plots – RP and recurrence quantification analysis – RQA).

Метод рекуррентных графиков был разработан в [3]. Он основан на анализе близости точек в лаговом пространстве $\mathbf{X}(t_i) = \mathbf{X}_i; \mathbf{X}(t_j) = \mathbf{X}_j$, понимаемой в смысле Грас-сбергера-Прокаччи [4]:

$$R_{i,j}(r, m) = \theta(\varepsilon_i - \|\mathbf{X}_i(m) - \mathbf{X}_j(m)\|). \quad (2)$$

Здесь θ – функция Хевисайда, а в качестве нормы вектора мы для ускорения расчетов использовали максимальную норму (L_∞):

$$L_\infty = \|\mathbf{X}\| = \max|x_i|, \quad (3)$$

т. е. выбирался максимальный из модулей его проекций. Рекуррентный график представляет собой двумерное множество точек, отвечающих соотношению (2), состоящее из нулей и единиц, причем близкие (рекуррентные) точки принято отображать черным цветом, а далекие – белым. Близость точек определяется параметром ε_i . Если выбрать его слишком большим, то большинство точек окажутся близкими друг другу, и график будет представлять собой поле черного цвета, а если слишком малым, то рекуррентных точек практически не будет. Отсюда следует, что способ выбора величины порога ε_i весьма важен для анализа конечного результата. Для расчета были выбраны параметры $m = 1$, $\varepsilon = 0,1\sigma$, величина порога, одинаковая для всех точек, не превышала десятых, а иногда и сотых долей максимального диаметра фазового пространства σ , как это предложено в [5]. Однако для сейсмических данных такой выбор порога также не всегда оказывался эффективным. Если в системе присутствуют редкие события с большими амплитудами, то в выборке, содержащей такие события, порог оказывается слишком большим (в силу большой величины σ), что порождает артефакты в виде структур, которых реально не существует. Чтобы избежать этого, амплитуды шести крупных событий, произошедших за время наблюдения, были уменьшены на три десятичных порядка.

Для построения RP и расчета RQA использовался свободно распространяемый пакет программ CRP Toolbox [6]. На рис. 1 приведены рекуррентные графики из 128 событий с конечными датами 13.01.2010 и 24.01.2011. График на рис. 1а представляет собой случайный набор точек без какой-нибудь выраженной структуры. Такой набор точек характерен для стохастического процесса. Главная диагональ на этом графике означает лишь тот факт, что точки всегда рекуррентны сами себе. Напротив, на графике рис. 1б прослеживаются диагональные (не совпадающие с главной диагональю) линии, а также вертикальные и горизонтальные структуры. Такие структуры свидетельствуют о наличии упорядоченности процесса. Диагональные линии отвечают участкам фазовой траектории, находящимся вблизи друг от друга в течение времени, пропорционального их длине [6].

В расчетах предполагается, что номер события примерно пропорционален времени его проявления. Вертикальные и горизонтальные черные структуры, перемежающиеся белыми линиями, отвечают временному интервалу, внутри которого состояние системы слабо меняется (области ламинарности) [6]. Как известно, 29.01.2011 на руднике произошел ряд крупных акустических событий, и примечательно, что по мере приближения к этой дате в рекуррентных графиках стала проявляться структурированность, отвечающая увеличению детерминированности в эволюции процесса.

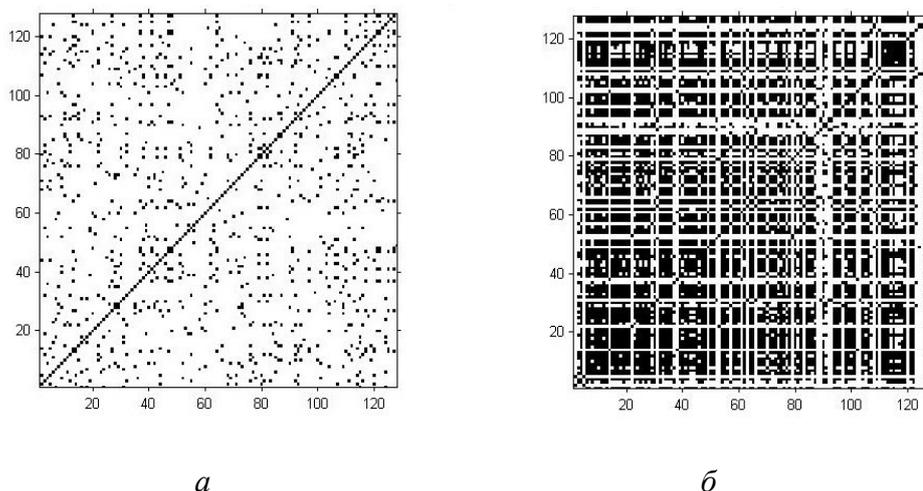


Рис. 1 – Рекуррентные графики амплитуд событий с конечными датами 13.01.2010 (а) и 24.01.2011 (б)

Для получения количественных характеристик рекуррентных графиков и их изменений во времени был использован метод RQA, разработанный в [7]. На рис. 2 приведены зависимости от времени таких параметров количественного анализа, как детерминизм (DET), энтропия диагональных линий (ENTR) и ламинарность ((LAM). Эти характеристики определяются следующим образом [5]:

$$DET = \frac{\sum_{l=l_{\min}}^N IP(l)}{\sum_{l=1}^N IP(l)} \quad (4)$$

Здесь $P(l)$ – гистограмма диагональных линий длиной l на рекуррентном графике, l_{\min} – минимальная длина диагонали ($l_{\min} > 1$). Для случайных, слабо коррелированных процессов рекуррентные графики либо вообще не содержат диагональных линий (за исключением главной диагонали), либо длина этих линий очень мала. Наоборот, детерминированные процессы имеют более длинные диагонали и меньшее количество изолированных точек. Таким образом, величина DET является отношением числа рекуррентных точек, формирующих диагональные линии, параллельные главной диагонали, к полному числу рекуррентных точек.

Под энтропией диагональных линий понимается информационная энтропия Шеннона для плотности вероятности распределения диагональных линий $p(l) = P(l)/N_l$, параллельных главной диагонали:

$$ENTR = - \sum_{l=l_{\min}}^l p(l) \ln p(l) \quad (5)$$

Эта энтропия отражает сложность системы в смысле распределения отрезков диагональных линий. Если в системе нет длинных отрезков и их длина не меняется сильно, то энтропия мала. Это характерно для случайных некоррелированных процессов. Большая энтропия соответствует детерминированным периодическим процессам. Следует отметить, что такое поведение энтропии противоположно поведению обычной термодинамической энтропии, которая максимальна в положении термодинамического равновесия.

Аналогично детерминизму для диагональных линий можно ввести такую же меру для вертикальных линий, которая носит название ламинарности

$$LAM = \frac{\sum_{v=v_{\min}}^N vP(v)}{\sum_{v=1}^N vP(v)} \quad (6)$$

и определяется отношением числа рекуррентных точек, формирующих вертикальные линии, к полному числу рекуррентных точек. Ламинарность, как уже отмечалось выше, соответствует временным областям, внутри которых состояние системы слабо меняется. Если рекуррентный график состоит в основном из отдельных точек, то его ламинарность мала.

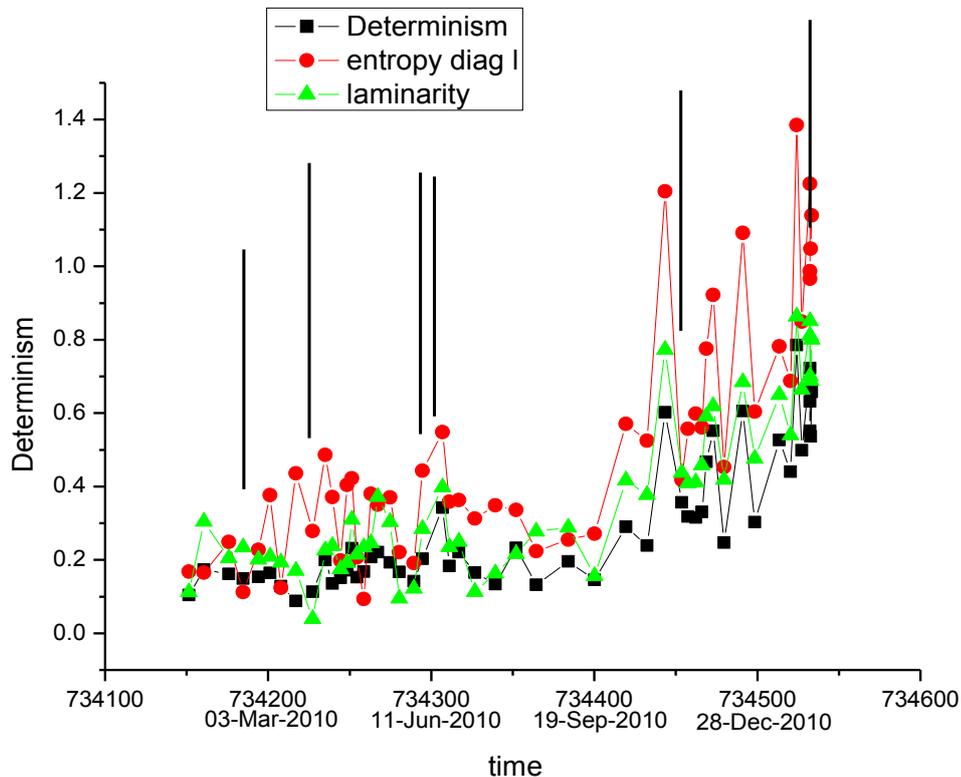


Рис. 2 – Изменения во времени параметров рекуррентных графиков на месторождении Антей в 2010 – январе 2011 г.

Вертикальными линиями отмечены 6 крупных акустических событий, произошедших за это время

Из рис. 2 следует, что, начиная примерно с сентября 2010 г., все рассматриваемые характеристики имеют явно выраженную тенденцию к росту. Это сопровождается локализацией дефектов в этот же период времени, трансформацией формы их энергетического распределения от экспоненциальной к степенной, а также увеличением дисперсии вейвлет коэффициентов на нижних масштабных уровнях [8].

Как структурирование RP, так и изменение рассмотренных динамических характеристик указывают на увеличение степени детерминированности процесса разрушения материала перед катастрофическими событиями, выявленное в [9] на лабораторных образцах.

Литература

1. Dynamical systems and turbulence / Takens F. // In: Lecture notes in Math. V. 898. – Heidelberg-New York: Springer, 1981 – P. 366 - 381.
2. Развитие и модернизация системы контроля динамических проявлений горного давления на рудниках ОАО «ППГХО» / И.Ю. Рассказов, А.В. Гладырь, П.А. Аникин, В.С. Святецкий, Б.А. Просекин // Горный журнал. – 2013. – № 8 (2). – С. 9 - 14.
3. Recurrence plots of dynamic systems / Eckmann J.P., Kampost S.O, Ruelle D. // Europhys. Lett. – 1987. – V. 4. – № 9. – P. 973 - 977.
4. Characterization of strange attractors / Grassberger P., Procaccia I. // Phys. Rev. Lett. – 1983. – V. 50. – № 5. – С. 346 - 349
5. Topological analysis and synthesis of chaotic time-series / Mindlin G.B., Gilmore R. // Physica – 1992. – V. D58. – №. 1- 4. – P. 229 – 242.
6. Recurrence plots for the analysis of complex systems / Marwan N., Romano M.C., Thiel M., Kurths J. // Phys. Reports. – 2007. – V. 438. – № 5 - 6. – P. 237-329.
7. Embedding and delays as derived from quantification of recurrence plot / Zbilut J.P., Webber C.L. // Phys. Lett. – 1992. – V. A171. – №3 - 4. – P. 199 - 203.
8. Анализ статистических параметров данных геоакустического мониторинга на месторождении «Антей» / В.Л. Гиляров, Е.Е. Дамаскинская, А.Г. Кадомцев, И.Ю. Рассказов // ФТПРПИ. – 2014. – № 3. - С. 40 - 45.
9. Гиляров В.Л. Выявление детерминированной составляющей в сигналах акустической эмиссии от механически нагруженных образцов из горных пород / В.Л. Гиляров // Физика твердого тела. – 2015. –Т. 57. – Вып. 11. – С. 2204 - 2211.