

УДК 550.34+539.3(575.2)(04)

ПРИМЕНЕНИЕ АППАРАТА НЕЛИНЕЙНОГО АНАЛИЗА ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

В.Н. Сычев

Изложены результаты применения расчетов формальных характеристик для тестовых примеров и для экспериментальных данных. Используются два подхода, не требовательные к качеству входных данных и не требующие реконструкции фазовой динамики системы: IFS dumpiness test и RP-recurrence plots. В качестве экспериментальных данных использованы активности акустической эмиссии нагруженных образцов геоматериалов, и каталог землетрясений за 1998–2008 гг.

Ключевые слова: нелинейный анализ; электроразондирование; МГД-генератор.

Введение. Цель работы – применить методы нелинейного анализа процессов на основе формальных характеристик к анализу сейсмологических данных: носит ли изменение сейсмического режима в период воздействия мощными электрическими импульсами на земную кору случайный характер либо присутствует детерминизм в рассматриваемом явлении?

Методика исследования. Наряду с проведением режимного электроразондирования на территории БГП периодически проводились дополнительные зондирования (2000–2005 гг.), при которых макетировалась однополярная форма импульсов МГД-генераторов. В экспериментальных режимах включения ЭРГУ-600-2 в период 2000–2005 гг. энерговыход в земную кору был сопоставим с энергией слабого землетрясения ($\sim 10^8$ Дж) и превышал энерговыход при зондированиях с использованием МГД-генераторов. При этом временная зависимость (профиль) импульсов тока была аналогична однополярным электроимпульсам при пусках МГД-генераторов. Обработка и интерпретация сейсмических данных в период экспериментальных зондирований (2000–2005 гг.), в целом подтвердили эффект кратковременного прироста слабой сейсмичности под влиянием однополярных электроимпульсов [1]. Задачей следующего этапа исследований становится выделение особенностей и/или закономерностей откликов сейсмической активности, позволяющих выбрать наиболее правдоподобную модель среди гипотез о механизме электромагнитного влияния на среду.

В последнее время набор традиционных (линейных) методов исследования временных

рядов был существенно расширен нелинейными методами, полученными из теории нелинейной динамики и хаоса; многие исследования были посвящены оценке нелинейных характеристик и свойств естественных и искусственных систем. Однако большинство методов нелинейного анализа требуют либо достаточно длинных, либо стационарных рядов данных, которые далеко не всегда возможно получить на практике при исследовании реальных систем. В свою очередь, наблюдаемые явления в виде дискретных значений в различные моменты времени можно рассматривать как хаотический процесс, представляющий собой нечто среднее между детерминированным процессом и стохастическим. Формальные характеристики хаотического процесса, как правило, отражают, насколько он близок к процессу детерминированному или, наоборот, к шуму. Иногда в этом случае говорят об оценке детерминизма в процессе. Для вычисления одних характеристик необходимо восстанавливать фазовую динамику системы, для других этого не требуется. В данной работе рассмотрим последний случай. Для того чтобы отличить случайный сигнал от детерминированного продемонстрируем два подхода: *IFS dumpiness test* (дословно это название переводится с английского как “тест на сгустки в системах итерированных функций”) и *RP – recurrence plots* (рекуррентные диаграммы).

IFS dumpiness test. Тест позволяет отличать белый шум от коррелированных шумов (розовый, коричневый) и хаотических процессов [2].

Исходный ряд отображается на некоторое множество точек внутри заданного квадрата. Ха-

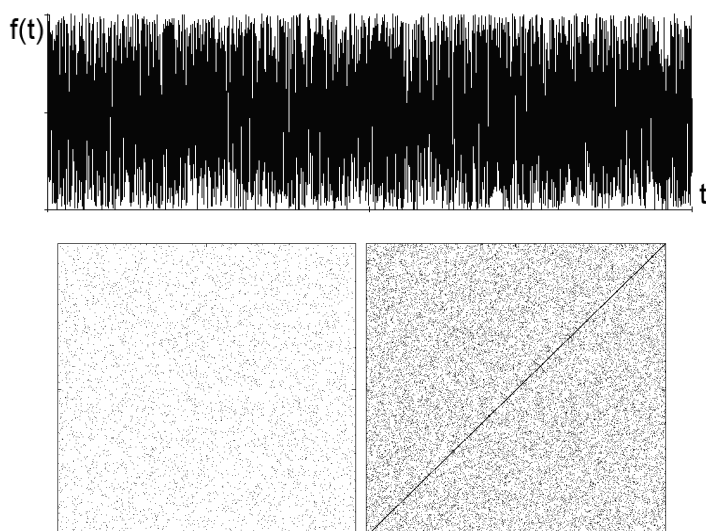


Рис. 1. “Белый шум” и результаты обработки по методикам IFS clumpiness test (слева) и RP (справа).

рактически равномерное распределение точек по квадрату зависит от исследуемого процесса. Если мы имеем дело с белым шумом, точки заполняют квадрат равномерно, детерминированные процессы приводят к появлению диагональных структур; хаотические процессы также приводят к неравномерному распределению точек.

Recurrence plots. В [3] предложен метод, расширяющий возможности нелинейного анализа временных рядов, который основан на фундаментальном свойстве диссипативных динамических систем – рекуррентности (повторяемости состояний).

Рекуррентные диаграммы (RP) позволяют изучать многомерные процессы через отображение рекуррентностей траектории на двумерную двоичную матрицу размером $N \times N$, в которой 1 (черная точка) соответствует повторению состояния при некотором времени i в некоторое другое время j , а обе оси координат являются осями времени:

$$R_{i,j} = \Theta(\varepsilon_i - \|x_i - x_j\|), \quad i,j = 1 \dots N, \quad (1)$$

где Θ – функция Хэвисайда, N – длина ряда состояний x_i , ε_i – размер окрестности, $\| \cdot \|$ – норма. По определению $R_{i,i} = 1$ – главная диагональ RP, “линия идентичности” (в дальнейшем LOI), проходящая из угла с координатами $(0; 0)$ в $(N; N)$ под углом $\pi/4$ к осям координат.

Внешний вид RP позволяет достаточно однозначно судить о характере протекающих в системе процессов, наличии и влиянии шума,

о наличии ламинарных состояний, совершении экстремальных событий, дрейфе.

Для расчетов по методам IFS clumpiness test и RP разработано специальное программное обеспечение на языке C++.

Тестирование. На рис. 1 приведен “белый шум” и результаты обработки по методикам IFS clumpiness test и RP.

Модулирование “белого шума” периодическим сигналом приводит к появлению размытых линейных и кольцевых структур на диаграммах, построенных по методам IFS clumpiness test и RP (рис. 2). Тестирование показало, что разработанное программное обеспечение дает результаты, которые хорошо согласуются с результатами в опубликованных работах по применению этих методов, например [3–6].

Анализ активности акустической эмиссии. Для выявления характерных особенностей влияния внешнего электрического поля на нагруженные образцы гетерогенных материалов в ИС РАН были проведены эксперименты на различных образцах горных пород. Не вдаваясь в детали проведения эксперимента, которые описаны в работах [7–9], приведем результаты обработки двух вариантов активности акустической эмиссии (количество событий в единицу времени) по методам IFS clumpiness test и RP. В обоих случаях испытывался один и тот же образец габбро размерами $70 \times 40 \times 17$, но при разных сжимающих нагрузках. В качестве дополнительного воздействия применялся источник

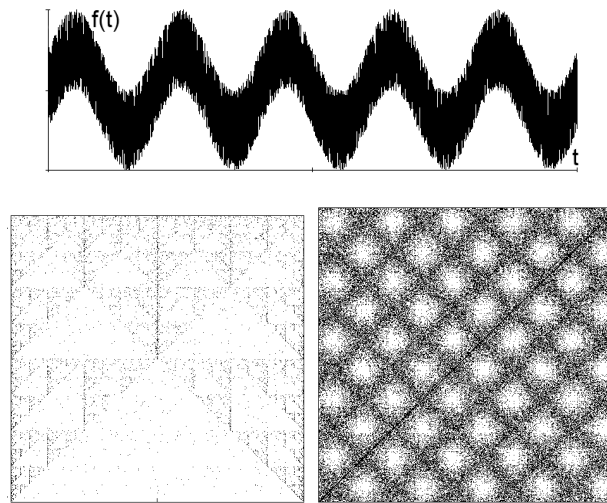


Рис. 2. “Белый шум”, модулированный периодическим сигналом и результаты обработки по методикам IFS clumpiness test (слева) и RP (справа).

электрических импульсов – конденсаторный разрядник.

На рис. 3, 4 приведены зависимости активности акустической эмиссии (АЭ) от времени и построения для этих кривых по методам IFS clumpiness test (слева) и RP (справа).

В первом случае (рис. 3) не происходит активации во время дополнительных воздействий, и, как следствие, характер распределения точек выглядит равномерным по всей площади как для

диаграммы IFS clumpiness test (слева), так и для диаграммы RP(справа).

Во втором случае (рис. 4) происходит рост активности АЭ под влиянием внешних воздействий, и это находит свое отражение в неравномерном распределении точек при построении рекуррентных диаграмм – появляются вертикальные, горизонтальные и диагональные линии, которые свидетельствуют о присутствии детерминизма в наблюдаемом процессе.

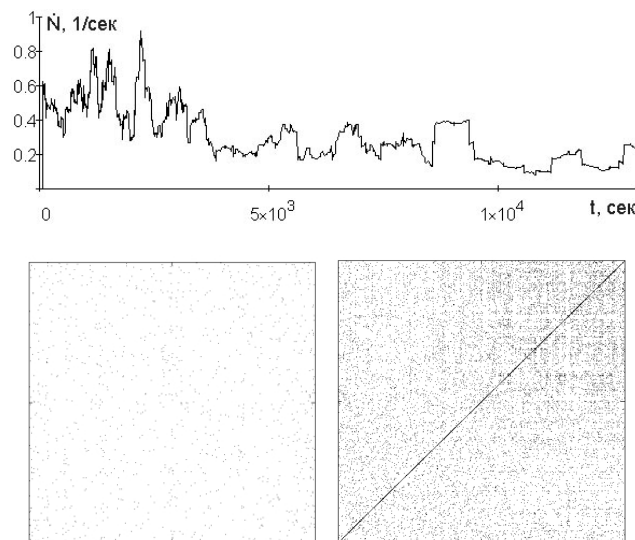


Рис.3. Активность образца габбро и результаты обработки ее по методикам IFS clumpiness test (слева) и RP(справа). Отклика на воздействие не зафиксировано.

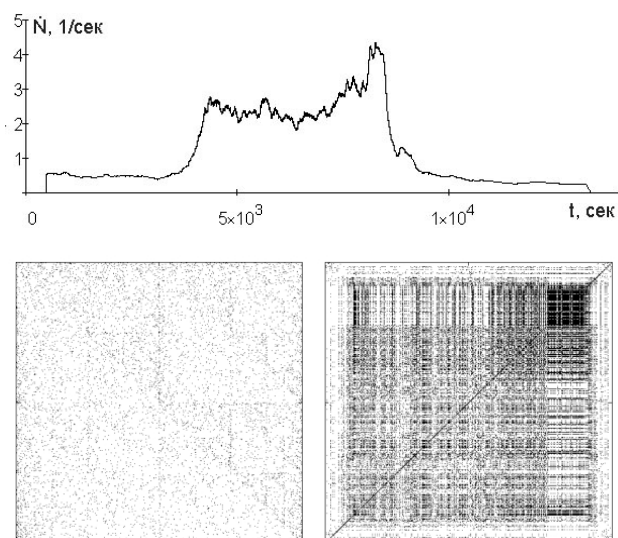


Рис. 4. Активность образца габбро и результаты обработки ее по методикам IFS clumpiness test (слева) и RP (справа). Присутствует отклик на дополнительное воздействие.

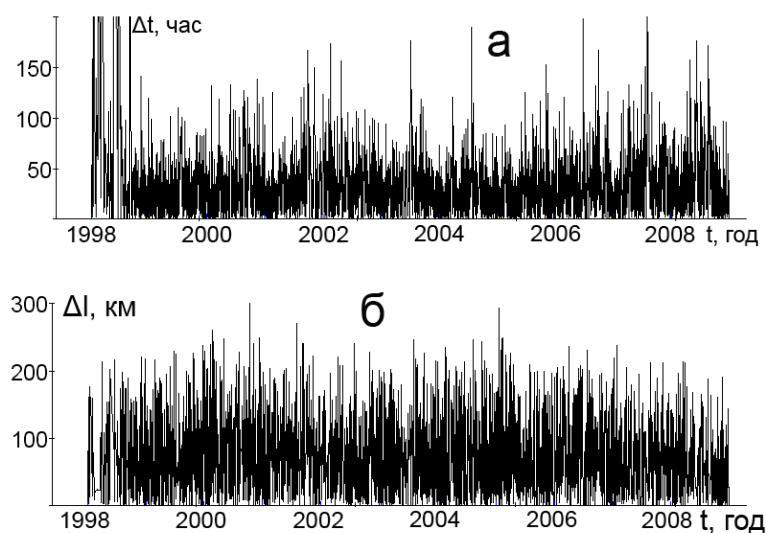


Рис. 5. Поведение рассматриваемых параметров за 1998-2008 гг.: а – интервалы времени; б – расстояния между последовательными событиями.

Расчеты по сейсмологическим данным. Аппарат нелинейного анализа динамических систем последнее время стал широко применяться к обработке сейсмологических данных [см. 10, 11]. Для анализа использован каталог сейсмических событий, созданный в ИС РАН на базе данных сети KNET. Была сформирована выборка событий с 1998 по 2008 г. и выбран линейный участок графика повторяемости в пределах

$K = 6,5-10,5$. В качестве исследуемого параметра использовались интервалы времени и расстояния между последовательными событиями. Характер поведения этих параметров на рассматриваемом интервале времени приведен на рис. 5.

Стоит заметить, что характер распределения при расчетах по IFS clumpiness test для интервалов времени и расстояний между событиями сильно не менялся, поэтому приведен лишь

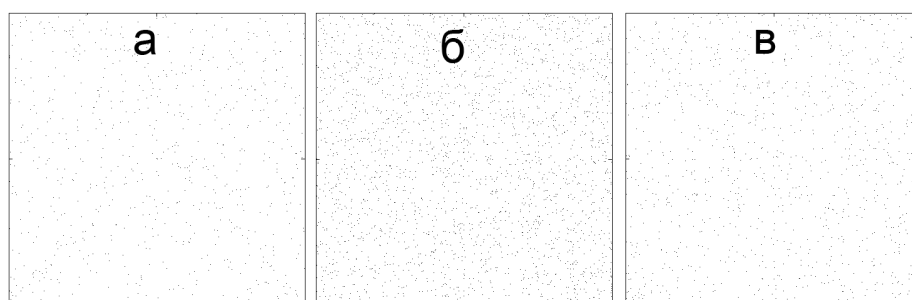


Рис. 6. IFS clumpiness test: а – 1998–1999 гг., б – 2000–2005 гг., в – 2006–2008 гг.

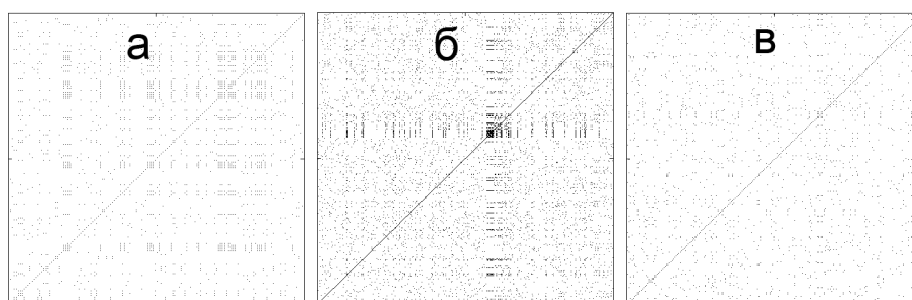


Рис. 7. RP, интервалы времени: а – 1998–1999 гг., б – 2000–2005 гг., в – 2006–2008 гг.

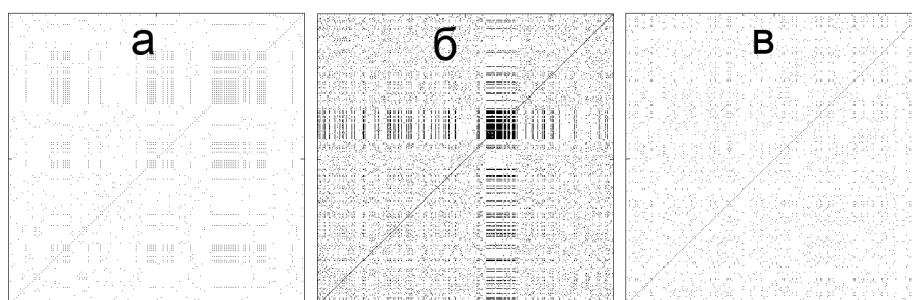


Рис. 8. RP, расстояния между событиями: а – 1998–1999 гг., б – 2000–2005 гг., в – 2006–2008 гг.

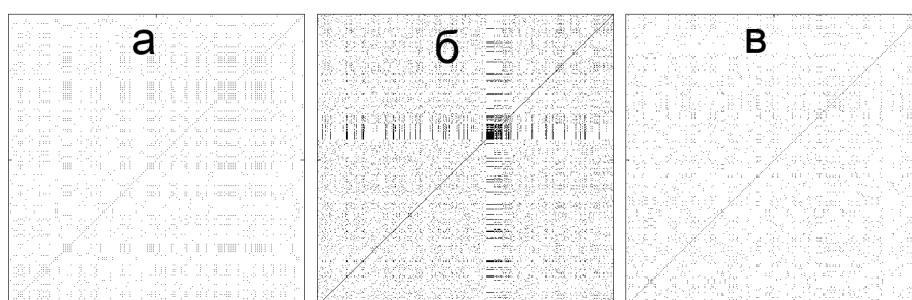


Рис. 9. JRP, интервалы времени и расстояния между событиями: а – 1998–1999 гг., б – 2000–2005 гг., в – 2006–2008 гг.

один вариант – по интервалу времени. Производился также и расчет совместных рекуррентных диаграмм (**joint recurrence plot, JRP**) по двум параметрам одновременно – по времени и по расстоянию:

$$R_{i,j} = \Theta(\varepsilon_x - \|\vec{x}_i - \vec{x}_j\|) \cdot \Theta(\varepsilon_y - \|\vec{y}_i - \vec{y}_j\|), \quad i, j = 1 \dots N, \quad (2)$$

где x – время; y – расстояние, остальные обозначения как в (1).

Результаты построений по методам IFS clumpiness test, RP и JRP приведены на рис. 6 – 9.

Целью построений было выявление свидетельств изменения сейсмического режима при дополнительных энергетических воздействиях. Для этого весь исследуемый интервал времени (1998–2008 гг.) был разбит на три интервала – до экспериментальных воздействий (1998–1999), период воздействий (2000–2005) и после экспериментальных воздействий (2006–2008 гг.) На рис. 6 представлены построения с использованием метода IFS clumpiness test.

Можно отметить, что при построениях с помощью IFS clumpiness test наблюдается равномерное распределение точек по всей площади диаграммы.

На рис. 7, 8 представлены рекуррентные диаграммы, построенные за выбранные интервалы времени и с использованием временных интервалов и расстояний между событиями, а на рис. 9 – совместная рекуррентная диаграмма JRP.

Как видно на рисунках, в 1998–1999 и 2006–2008 гг. поведение рассматриваемых параметров близко к случайному, если и есть какие-то структуры на диаграммах RP и JRP, то они слабо выделены. Иная картина наблюдается при построении диаграмм за 2000–2005 гг.

На рекуррентных диаграммах, соответствующих этому этапу, построенных как с использованием интервалов времени, так и с использованием расстояний между последовательными событиями, образуются области либо полностью заполненные точками, либо формируются вертикальные и диагональные структуры. Это говорит о том, что наблюдаемый процесс становится более детерминированным, т.е. экспериментальные воздействия оказывают влияние на сейсмический режим.

Таким образом, применение методов нелинейного анализа процессов к обработке материалов экспериментальных электромагнитных зондирований 2000–2005 гг. продемонстрировало, что зондирования, проводимые в 2000–2005 гг. оказывают влияние на сейсмологический процесс, а именно – сейсмологический процесс становится детерминированным, а возбуждение мощных импульсов тока в земной коре обладает

определенным потенциалом для стимулирования слабой сейсмичности.

Настоящее исследование осуществлено частично благодаря гранту РФФИ № 09-05-00687а.

Литература

1. Сычев В.Н., Авагимов А.А., Богомолов Л.М. и др. О триггерном влиянии электромагнитных импульсов на слабую сейсмичность // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. Новосибирск: Изд. Ин-та горного дела СО РАН. 2008. С. 179–188.
2. Sprott J. C., Rowlands G. Chaos data analyzer; the professional version. AIP, NY, 1995.
3. Eckmann J.P., Kamphorst S.O., Ruelle D. Recurrence Plots of Dynamical Systems // Europhysics Letters 5. 1987. P. 973–977.
4. Gao J., Cai H. On the structures of quantification of recurrence plots // Physics Letters A 270. 2000. P. 75–87.
5. Marwan N., Romano M.C., Thiel M., Kurths J. Recurrence plots for the analysis of complex systems // Physics Reports 438. 2007. P. 237–329.
6. Marwan N. A Historical Review of Recurrence Plots // European Physical Journal. 2008. ST 164. P 3–12.
7. Богомолов Л.М., Закупин А.С., Аладьев А.В., Боровский Б.В. и др. Влияние внешнего электромагнитного поля на активность акустической эмиссии нагруженных геоматериалов // Геодинамика и геоэкологические проблемы высокогорных регионов / Под ред. Ю.Г. Леонова и С.В. Гольдина. Москва–Бишкек, 2003. С. 304–324.
8. Богомолов Л.М., Адигамов Н.С., Сычев В.Н., Закупин А.С. Феноменологическое описание разномасштабных триггерных эффектов при деформировании геосреды в присутствии физических полей. Бишкек. Препринт ИС РАН 1-06. 2006. 40 с.
9. Богомолов Л.М., Закупин А.С., Авагимов А.А. Отклики акустической эмиссии геоматериалов на воздействие электроимпульсов при различных величинах сжимающего напряжения // Физика Земли. 2006. № 10. С.43–50.
10. Chelidze T., De Rubeis V., Matcharashvili T., Tosi P. Influence of strong electromagnetic discharges on the dynamics of earthquake time distribution in the Bishkek test area (Central Asia) // Annals of Geophysics. 2006. Vol.49. №. 4/5. P. 961–975.
11. Tosi P., Rubeis V.D., Loreto V., Pietronero L. Space-time combined correlation integral and earthquake interactions // Annals of Geophysics. 2004. Vol. 47. № 6. December.