

ПАРАМЕТРЫ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ НАБЛЮДАЕМЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Черепанцев А.С.

Южный федеральный университет, г. Таганрог, s6319a@mail.ru

Введение

Наряду с исследованиями потока сейсмических событий, являющегося дискретным отражением непрерывного во времени процесса эволюции напряженного состояния геологической среды, активно развивается и непрерывный контроль физических процессов, чувствительных к напряженному состоянию. Сложность подобных наблюдений связана с решением задач создания сети наблюдений при неоднородном характере пространственной организации дискретной среды, контроля большого числа внешних воздействующих источников, надежного метрологического обеспечения.

Непрерывный характер наблюдений параметров состояния среды по данным вариаций уровня воды в скважине, электрического сопротивления, деформаций, наклонов, концентрации радона и т.д. позволяют расширить спектр подходов к исследованию поведения деформационных процессов. Одним из концептуальных подходов к описанию временных рядов геофизических полей различной природы является анализ свойств динамической системы, формирующей наблюдаемые вариации.

Обоснованность такого подхода определяется сопоставлением закономерностей, присущих нелинейным динамическим системам, и имеющихся результатов регистрации геофизических полей. Это степенной характер распределений магнитуд землетрясений с фрактальным пространственным распределением эпицентров землетрясений и степенной характер распределения межточечных расстояний в фазовом пространстве динамической системы типа странного аттрактора, ограниченность времени прогноза землетрясений и предсказания поведения хаотической системы, присутствие в обоих случаях нелинейного взаимодействия элементов системы, диссипативный характер рассматриваемых процессов.

Уникальность выбранных для анализа данных скважинных наблюдений комплекса геофизических полей объемной деформации, уровня воды, наклонов поверхности, значения потенциала на поверхности, полученных в ходе длительных наблюдений американскими геофизиками в рамках проекта РВО (Plate Boundary Observatory), определяется наличием сети наблюдений в различных пространственных точках тектонически активного региона, размером выборок, достигающим $N \sim 10^6$ временных отсчетов, надежным метрологическим обеспечением измерений, регистрацией внешних воздействующих факторов [1].

В ряде работ [2], [3] показана применимость подходов нелинейной динамики к рассмотрению наблюдаемых геофизических полей как отдельной компоненты динамической системы. В работе [3] приводятся оценки ряда инвариантных параметров динамических систем. Предлагаемая работа может служить продолжением данной тематики. В ней рассмотрены характеристики динамических систем наблюдаемых геофизических полей на различных временных масштабах и возможность оценки параметров динамической системы, формирующей наблюдаемую сейсмичность в области наблюдений сегмента Паркфилд разлома Сан-Андреас.

Методика расчета и исходные данные

В основе оценки инвариантных параметров динамической системы, формирующей наблюдаемые вариации исследуемого физического параметра, лежит анализ поведения системы в фазовом пространстве, включающем все возможные состояния системы. В качестве системы, сохраняющей инвариантные параметры исходной неизвестной системы, в практических расчетах, как правило, используется преобразование временного сдвига единственной координаты:

$$\mathbf{X}(t) = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)\} \Leftrightarrow \mathbf{Y}(t) = \{x_i(t), x_i(t-\tau), \dots, x_i(t-(n-1)\tau)\}, \quad (1)$$

где τ - временной сдвиг отсчетов в имеющейся серии.

Преобразование (1) позволяет построить новый фазовый портрет исследуемой динамической системы в n -мерном пространстве и оценить ее характеристики, совпадающие с характеристиками исходной неизвестной динамической системы.

В основе оценок инвариантных параметров лежит расчет корреляционного интеграла

$$C_n^{(s)}(\rho) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N \mathcal{G} \left(\rho - \sum_{k=0}^{s-1} \|\mathbf{y}_{i+k}^{(n)} - \mathbf{y}_{j+k}^{(n)}\| \right), \quad (2)$$

где: $\mathcal{G}(\cdot)$ - единичная функция Хевисайда, N - длина реализации.

Он представляет собой функцию распределения суммарного расстояния между последовательными k парами точек фазовой траектории: $\rho(\mathbf{Y}(t_i), \mathbf{Y}(t_j))$.

Исходя из (2) может быть рассчитана корреляционная энтропия динамической системы K_2 , представляющая собой оценку суммы положительных показателей Ляпунова $\lambda_k > 0$ динамической системы. Она определяется [4], исходя из соотношения:

$$K_2 \cong \frac{1}{\Delta t} \lim_{\rho \rightarrow 0} \lim_{s \rightarrow \infty} \ln \frac{C_n^{(s)}(\rho)}{C_n^{(s+1)}(\rho)}. \quad (3)$$

Величина K_2 позволяет оценить время предсказуемости поведения системы с учетом скорости разбегания близких траекторий фазового пространства:

$$\Delta r(t) \approx \Delta r(0) \cdot \exp(K_2 \cdot t).$$

Расчет K_2 требует знания размерности фазового пространства n , используемого в (2). Размерность фазового пространства n определяется числом независимых уравнений в (1) и также является инвариантным параметром динамической системы.

Общий подход к оценке n заключается в оценивании некоторого инвариантного динамического параметра при повышающихся значениях размерности фазового пространства k и определения k_{\min} , начиная с которого искомый параметр перестает зависеть от значения k . В качестве оценки n принимается k_{\min} . Оценку n можно получить при расчете еще одного инвариантного параметра динамической системы - корреляционной размерности d_2 . Для ее оценки проводится расчет функции распределения расстояний между парами точек фазовой траектории, называемого корреляционным интегралом $C_2(\rho)$. Он соответствует (2) при $s=1$:

$$C_2(\rho) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N^2} \sum_{i,j} \mathcal{G}(\rho - \|\mathbf{X}_i - \mathbf{X}_j\|). \quad (4)$$

Величина наклона функции распределения характеризует степень неоднородности заполнения траекториями фазового пространства и определяет d_2 [5].

В работе рассмотрены временные ряды скважинных ($H \approx 250$ м) наблюдений объемной деформации, наклонов поверхности, уровня воды в скважине для полигона Паркфилд, а также поверхностного электрического потенциала полигона Лонг Вэлли. Тектоническая активность выбранных полигонов определяется различными источниками. В случае полигона Парфилд - это межплитовая активность по разлому Сан-Андреас, в случае полигона Лонг Вэлли - это вулканическая активность, сопровождаемая проявлением активной гидротермальной системы.

Предварительная обработка исходных данных включала в себя удаление одиночных выбросов, компенсацию участков со смещением на постоянную величину, изъятие участков пропущенных и искаженных данных, снятие временного тренда, выделение и снятие компонент внешних аддитивно воздействующих барического, приливного факторов и фактора осадков. С целью получения устойчивого во времени фазового портрета динамической системы и статистической представительности областей фазовых траекторий (наличие близких траекторий в фазовом пространстве) применена ВЧ фильтрация с частотой среза $f_{cut} = 0.01$ 1/сутки.

На рис. 1 представлены вариации рассматриваемых геофизических полей после проведения предварительной обработки.

В работе рассмотрена возможность представления сейсмических данных полигона Паркфилд (каталог USGS NCSN) как самостоятельного непрерывного геофизического поля, формируемого некоторой динамической системой. Предполагая, что напряженно-деформируемое состояние в

областях непосредственной близости к разлому определяется движением вдоль разлома, для дальнейшего анализа сейсмичности выбраны события, удаленные от разлома на расстояния не более 10 км.

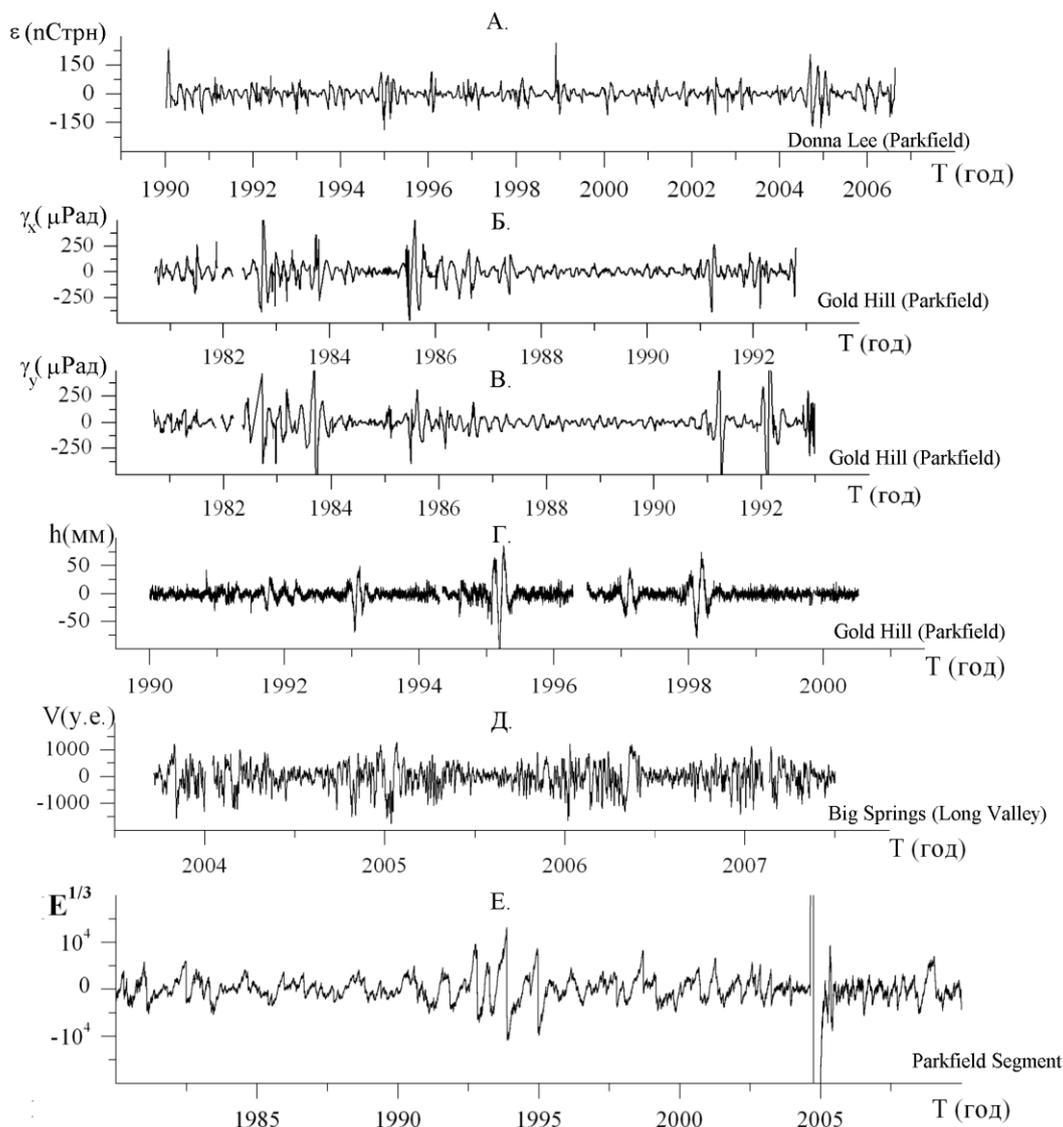


Рис.1. Временные ряды геофизических полей. А.- объемная деформация; Б- х-компонента наклона поверхности; В- у-компонента наклона поверхности; Г.- уровень воды в скважине; Д.- электрический потенциал на поверхности ; Е.- параметр сейсмичности.

Для построения непрерывной компоненты сейсмичности рассмотрен кумулятивный ряд:

$$A(t_i) = \sum_{k=0}^n [E_k(t_k \leq t_i)]^{1/3}. \quad (5)$$

На рис. 1Е показан ряд сейсмического параметра после снятия временного тренда и ВЧ фильтрации. Сброс сейсмического параметра в конце 2004 г. связан с произошедшим крупным землетрясением ($M = 6.0$) с эпицентром, непосредственно в области наблюдений сегмента Паркфилд. С целью исключения возможных отклонений анализируемых параметров от фоновых значений, оценки параметров динамических систем наблюдаемых геофизических полей проведены по временному участку до возникновения землетрясения и связанной с этим афтершоковой активности.

Результаты расчета

При рассмотрении процесса с широкополосным спектром и спадом амплитуды по частоте, характерное время спада автокорреляционной функции и соответственно τ в (1) определяется длиннопериодными гармониками. При этом, формируемый по длиннопериодным компонентам, фазовый портрет может оказаться мало представительным для последующей статистической оценки распределения межточечных расстояний, предполагающей наличие большого количества траекторий в области оцениваемого размера. Для уменьшения τ рассмотрена частотная фильтрация исходных данных. Процедура временного масштабного сжатия включала в себя сжатие исходных данных путем увеличения интервала дискретизации Δt исходных данных и ВЧ фильтрацию полученного ряда с частотой отсечки $f_{cut} = 0.004/\Delta t$. Для оценок динамических параметров использовалась выборка объемом $N = 10^4$ отсчетов.

На рисунках 2,3,4 представлены расчетные зависимости корреляционной размерности d_2 , размерности системы n и корреляционной энтропии K_2 геофизических полей при различных значениях интервала дискретизации временных рядов Δt . С учетом (3) изменение K_2 при изменении временного масштаба удобно представить нормированной зависимостью $K_2\Delta t$. Буквенные обозначения кривых зависимостей соответствуют временным рядам на рис.1.

Для полей объемной деформации, наклонов поверхности и уровня воды в скважине наблюдается уменьшение размерностей d_2 , n и нормированной энтропии $K_2\Delta t$ с ростом временного масштаба рассмотрения. Это может быть связано с уменьшением количества n воздействующих факторов на наблюдаемые поля и соответственно упрощением динамической системы. При этом объемная деформация демонстрирует минимальные значения динамических параметров. Ранее на данную закономерность было указано в работе [3]. Уменьшение рассмотренных параметров вариаций объемной деформации с ростом временного масштаба остается значимым для интервалов дискретизации $\Delta t < 5$ часов. Для $\Delta t = 5 - 24$ часа динамические параметры остаются близкими к постоянным значениям. Это может указывать на временное самоподобие динамических систем, формирующих наблюдаемые вариации. Динамическая система, формирующая временной ряд сейсмического параметра, оказывается более

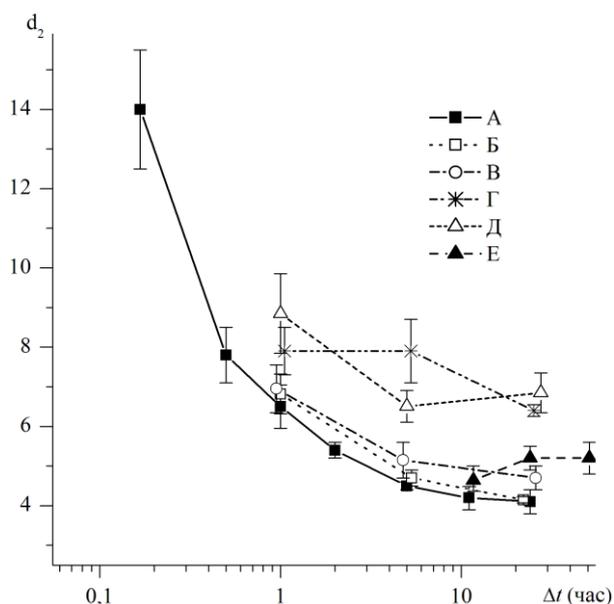


Рис.2. Размерность фазового портрета динамических систем геофизических полей на различных временных масштабах. А.- объемная деформация; Б- х-компонента наклона поверхности; В- у-компонента наклона поверхности; Г.- уровень воды в скважине; Д.- электрический потенциал на поверхности ; Е.- параметр сейсмичности.

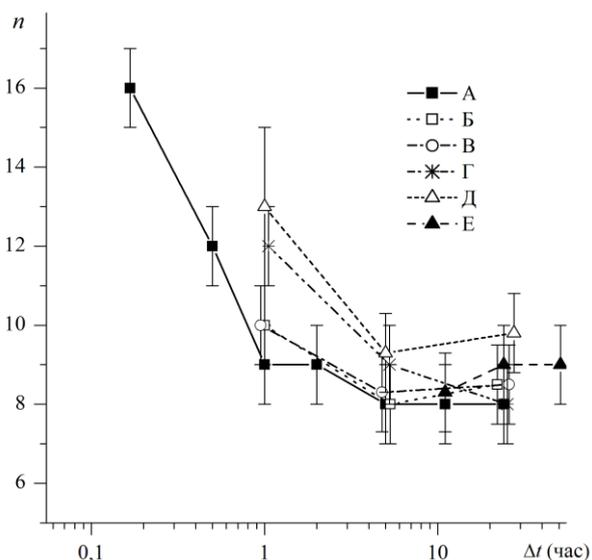


Рис.3. Размерность динамических систем геофизических полей на различных временных масштабах. А.- объемная деформация; Б- х-компонента наклона поверхности; В- у-компонента наклона поверхности; Г.- уровень воды в скважине; Д.- электрический потенциал на поверхности ; Е.- параметр сейсмичности.

формировать наблюдаемые вариации. Динамическая система, формирующая временной ряд сейсмического параметра, оказывается более

сложной по сравнению с системой объемной деформации. Близкие к постоянному значению динамические параметры на масштабах $\Delta t = 24$ часа и $\Delta t = 51$ час указывают на самоподобный характер сейсмического излучения. При этом уменьшение параметров при $\Delta t = 13.5$ часа может определяться недостаточной представительностью каталога и соответственно временной плотности представленных сейсмических событий.

Полученные оценки инвариантных динамических параметров d_2 , n , K_2 геофизических полей различной природы показывают, что динамическая система наклонов поверхности наиболее приближена к системе объемной деформации.

При этом вариации уровня воды описываются динамической системой большей размерности. Фазовый портрет данной динамической системы также имеет большую оценку хаусдорфовой размерности d_2 . Взятые

для анализа вариации поверхностного электрического потенциала в области активных геотермальных процессов кальдеры Лонг Вэлли демонстрируют сложный характер изменения динамических параметров на различных временных масштабах. Так спад нормированной энтропии в диапазоне масштабов $\Delta t = 1-5$ часов сменяется ростом

при $\Delta t = 5-24$ часа. Подобное поведение может указывать на существование различных источников, формирующих наблюдаемую картину вариаций в суточном и часовом диапазонах масштабов. Сложность динамической системы, формирующей вариации электрического потенциала характеризуют также повышенные значения размерностей d_2 , n на рассматриваемых масштабах по сравнению с значениями остальных анализируемых полей.

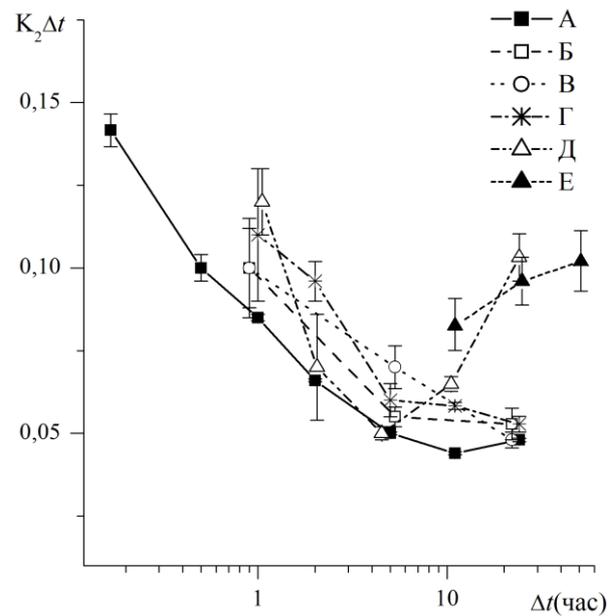


Рис.4. Нормированная корреляционная энтропия $K_2\Delta t$ динамических систем геофизических полей на различных временных масштабах. А.- объемная деформация; Б- х-компонента наклона поверхности; В- у-компонента наклона поверхности; Г.- уровень воды в скважине; Д.- электрический потенциал на поверхности; Е.- параметр сейсмичности.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 14-05-00521

Список литературы

1. Prescott W., Hodgkinson K., etc. Access to Strain and Other Low Frequency Geophysical Observations // EarthScope Workshop: Making and Breaking a Continent, 2001, Snowbird, Utah, 5 p.
2. Turcotte, D.L., Fractals and Chaos in Geology and Geophysics, 2nd ed. Cambridge University Press. 1997.
3. Смирнов В.Б., Пономарев А.В., Qian Jiadong, Черепанцев А.С. Ритмы и детерминированный хаос в геофизических временных рядах // Физика Земли. 2005. №6. с.6-28.
4. Шустер Г. Детерминированный хаос. М.: Мир, 1988. 240 с.
5. P. Grassberger, I. Procaccia, On the Characterization of Strange Attractors, // Phys.Rev.Lett., 50, 346.