

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ФЛИККЕР-ШУМОВОЙ СПЕКТРОСКОПИИ В ЗАДАЧЕ ИДЕНТИФИКАЦИИ ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИХ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Рябинин Г.В., Хаткевич Ю.М.

*Камчатский филиал Геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский.
gena@emsd.iks.ru, khat@emsd.iks.ru*

Введение

С 1977 г. на Камчатке проводятся систематические наблюдения за режимом подземных вод. Одной из главных задач наблюдений является оценка текущей сейсмической опасности для г. Петропавловска-Камчатского и его окрестностей. Оценка сейсмической опасности, в самом общем смысле, заключается в идентификации прогнозного признака – характеристики динамики изменения того или иного гидрогеохимического показателя, значимая величина которого может использоваться для прогнозных оценок вероятности возникновения сильных сейсмических событий. Проблема такого рода оценок заключается в том, что за все время исследований гидрогеохимических предвестников, проводившихся во многих сейсмоопасных регионах, так и не удалось выявить универсальный прогнозный признак, факт проявления которого с достаточной степенью достоверности можно было бы рассматривать как предвестник грядущего сейсмического события. В данной работе представлен общий феноменологический подход к решению этой проблемы – метод фликкер-шумовой спектроскопии (ФШС) [4, 6] (автор С.Ф. Тимашев, Научно-исследовательский физико-химический институт им. Л.Я. Карпова, г. Москва).

Сущность метода фликкер-шумовой спектроскопии

Появление в сложной динамической системе фликкер-шума связывается с эффектом перемежаемости (интермиттанса), который представляет собой смену достаточно длительных участков ламинарного или регулярного во времени поведения характеристик неравновесной динамической системы, – участками хаотических всплесков и скачков [3, 5]. Сущность ФШС подхода заключается в придании информационной значимости корреляционным взаимосвязям, которые реализуются в последовательностях нерегулярностей сигнала – всплесках, скачках, изломах производных различных порядков – как носителях информации об изменениях, происходящих на каждом пространственно-временном уровне иерархической организации исследуемой динамической системы [4, 6]. В качестве базового образа для извлечения информации из сложных сигналов в ФШС методе используется корреляционная функция:

$$\psi(\tau) = \langle V(t)V(t+\tau) \rangle, \quad (1)$$

где τ - параметр временной задержки, а угловые скобки обозначают осреднение по временному интервалу T

$$\langle (\dots) \rangle = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} (\dots) dt. \quad (2)$$

Для классификации информации, заключенной в корреляционной функции $\psi(\tau)$, удобно анализировать не саму эту функцию, а некоторые ее преобразования ("проекции"), такие как спектр мощности $S(f)$ (f – частота) и разностный момент ("переходная структурная функция") $\Phi^{(2)}(\tau)$ второго порядка:

$$S(f) = \int_{-T/2}^{T/2} \langle V(t)V(t+\tau) \rangle \exp(-2\pi if\tau) d\tau, \quad (3)$$

$$\Phi^{(2)}(\tau) = \langle [V(t) - V(t+\tau)]^2 \rangle. \quad (4)$$

Из приведенных соотношений следует, что "паспортные данные", извлекаемые из анализа зависимостей $S(f)$ и $\Phi^{(2)}(\tau)$, построенных на основе временных рядов $V(t)$, имеют смысл времен корреляций или параметров, характеризующих потерю "памяти" (корреляционных связей) для рассматриваемых нерегулярностей типа всплесков и скачков. При этом в формирование зависимостей $\Phi^{(2)}(\tau)$ вносят вклад только нерегулярности типа скачков динамической переменной $V(t)$, а в формирование $S(f)$ – и скачки, и всплески (выбросы) хаотических серий $V(t)$. Соответствующие параметры для нерегулярностей типа разрывов производных извлекаются из спектров мощностей и разностных моментов, построенных на основе "квазипроизводных" исходного сигнала [4, 6]. Основная цель ФШС процедур заключается в анализе зависимостей $S(f)$ и $\Phi^{(2)}(\tau)$, а точнее, в анализе динамики их изменения в пределах скользящего интервала длиной T , последовательно смещаемого в каждый дискретный момент времени $k\Delta T$ ($k = 0, 1, 2, 3, \dots$) на величину ΔT . В качестве меры изменения зависимостей $S(f)$ и $\Phi^{(2)}(\tau)$ во времени ФШС – процедура предполагает использование безразмерного критерия – параметра нестационарности, выражение для которого задается соотношением вида:

$$C(t_{k+1}) = 2 \cdot \frac{Q_{k+1} - Q_k}{Q_{k+1} + Q_k} \cdot \frac{\Delta T}{T}, \quad (5)$$

$$Q_k = \int_0^{\tau_{\max}} [\Phi^{(2)}(\tau)]_k d\tau \quad \text{или} \quad Q_k = \int_0^{f_{\max}} [S(f)]_k df. \quad (6)$$

Как следует из самого названия, вводимое соотношение характеризуют "меру нестационарности" анализируемого временного ряда при перемещении интервала усреднения T по оси времени на величину ΔT . Очевидно, что, теоретически, для стационарных процессов при неизменных значениях τ_{\max} или f_{\max} величина параметра нестационарности $C(t)$ будет равняться нулю на любом интервале осреднения. Фактически же величина параметра $C(t)$ должна варьировать от низких значений на интервалах, где наблюдается регулярные вариации, до весьма значительных там, где обнаруживаются нерегулярности типа всплесков, скачков и изломов производных. При этом возможность идентификации нерегулярностей различного масштаба связана с самой возможностью вариации величиной интервала усреднения T . Этот факт имеет большое значение, поскольку эволюция нестационарной системы может характеризоваться целым набором характерных времен структурных перестроек для соответствующего набора масштабов пространственной организации системы. В связи с этим, проблема прогнозирования становится многопараметрической, ориентированной на поиск, по крайней мере, нескольких временных "предвестников" катастрофического события, разнесенных по масштабу времени [1].

Анализ данных гидрогеохимических наблюдений методом ФШС

Для анализа использовались данные режимных наблюдений за изменением концентрации основных показателей химического и газового состава подземных вод за период с 1985 по 2007 гг.

В качестве иллюстрации рассмотрим пример использования метода ФШС для анализа временного ряда изменения концентрации хлор-иона в воде скважины № 44, расположенной в пределах Карымшинского участка Верхнепаратунского месторождения термальных вод (рис. 1). Этот временной ряд выбран не случайно, поскольку содержит ярко выраженную неинформативную составляющую – сезонные изменения концентрации. Здесь необходимо отметить, что компенсация подобного рода вариаций является обязательной частью процедуры подготовки данных, предшествующей их анализу на предмет идентификации предвестников землетрясений. В данном случае, мы намеренно игнорировали эту процедуру с тем, чтобы создать максимально неблагоприятные условия для тестирования метода ФШС. На рисунке 1 представлены графики вариаций параметра нестационарности (ПН), рассчитанного для данного временного ряда в скользящих временных окнах различной длины. Как видно из рисунка, основными "структурными элементами" вариаций ПН являются всплески его значений различной амплитуды, длительности и знака. Амплитуда всплеска, очевидно, будет являться показателем масштаба нерегулярности, попадающей в пределы скользящего окна при его последовательном смещении вдоль оси времени. Длительность всплеска также будет характеризовать масштаб

нерегулярности, но, в большей степени, будет зависеть от величины ΔT . Относительно знака изменения параметра нестационарности можно сказать, что информационную значимость представляют только положительные вариации параметра нестационарности. Отрицательные же значения ПН являются как бы эхом переднего фронта скользящего окна и не несут никакой самостоятельной информации, хотя могут существенно исказить картину в случае их наложения на последующий интервал нестационарности. Таким образом, при анализе вариаций параметра нестационарности нас будут интересовать положительные всплески его значений достаточно

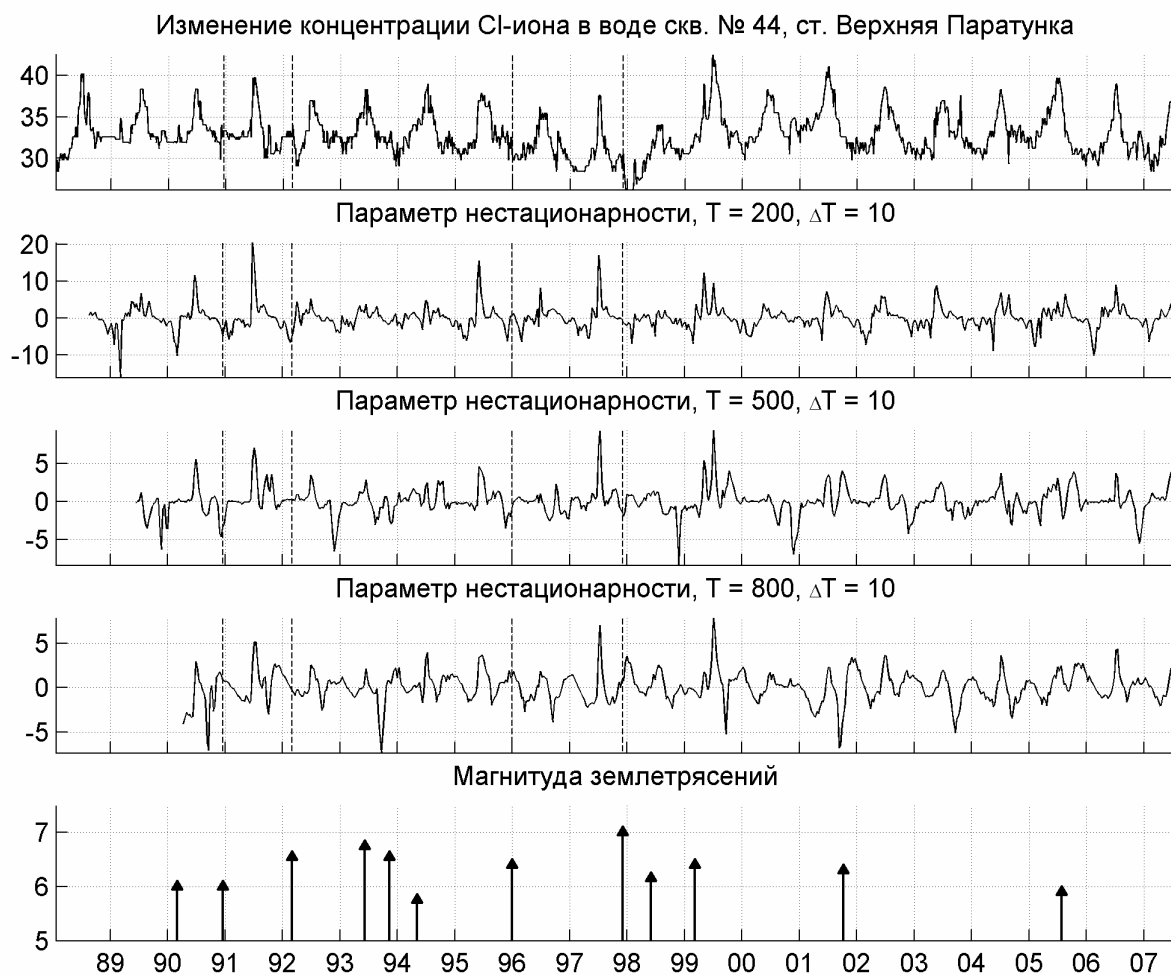


Рис. 1. Диаграмма изменения концентрации хлор-иона в воде скважины № 44 (ст. Верхняя Паратунка) и графики вариаций параметра нестационарности. T – величина скользящего окна в сутках, ΔT – интервал последовательного смещения скользящего окна в сутках.

большой амплитуды. Для того чтобы формализовать понятие "достаточно большая амплитуда" необходимо установить пороговый уровень вариаций ПН, выше которого величина изменения параметра нестационарности могла бы считаться значимой. Для этого можно воспользоваться простым модельным экспериментом, суть которого заключается в следующем. Сначала, с помощью генератора случайных чисел моделируется стационарный случайный процесс, имеющий нормальное распределение. Далее, в окнах различной длины для этого процесса рассчитываются значения параметра нестационарности. Повторяя эту процедуру несколько раз и накладывая результаты расчета на одну координатную ось, можно получить представления о диапазоне изменения параметра нестационарности для стационарного процесса типа "белого шума". Результаты данного модельного эксперимента при пятикратном повторении описанной процедуры представлены на рисунке 2. Из рисунка видно, что полученные значения параметра нестационарности не выходят за границы интервала ± 2 . С учетом того, что интерес для интерпретации представляют только положительные значения ПН, в качестве минимального порогового уровня можно использовать значения $ПН_{пор} = 2$. При анализе вариаций ПН, представленных на рисунке 1, использовалась заведомо бóльшая величина порогового значения

параметра нестационарности – $ПН_{пор} = 5$. Иными словами, полагалось, что интервалы, где значение $ПН < 5$ являются интервалами условно стационарного изменения концентрации растворенных в воде веществ и газов. Интервалы, в пределах которых значения $ПН \geq 5$ рассматривались как интервалы нестационарности. С учетом этого, на рисунке 1 можно выделить несколько интервалов, где значения параметра нестационарности превосходят установленный пороговый уровень. Нетрудно также заметить, что, в ряде случаев, значимые всплески $ПН$ предшествуют наиболее сильным сейсмическим событиям, моменты возникновения которых на графиках вариаций параметра нестационарности обозначены вертикальными пунктирными линиями. С другой стороны, из рисунка видно, что далеко не все землетрясения предваряются значимыми всплесками параметра нестационарности. Кроме того, встречаются ситуации, когда значимые всплески $ПН$ не предваряют сейсмических событий. В данном примере это замечание относится к интервалу нестационарности в середине 1999 г. Из этого следует вывод, что использование параметра нестационарности для идентификации гидрогеохимических

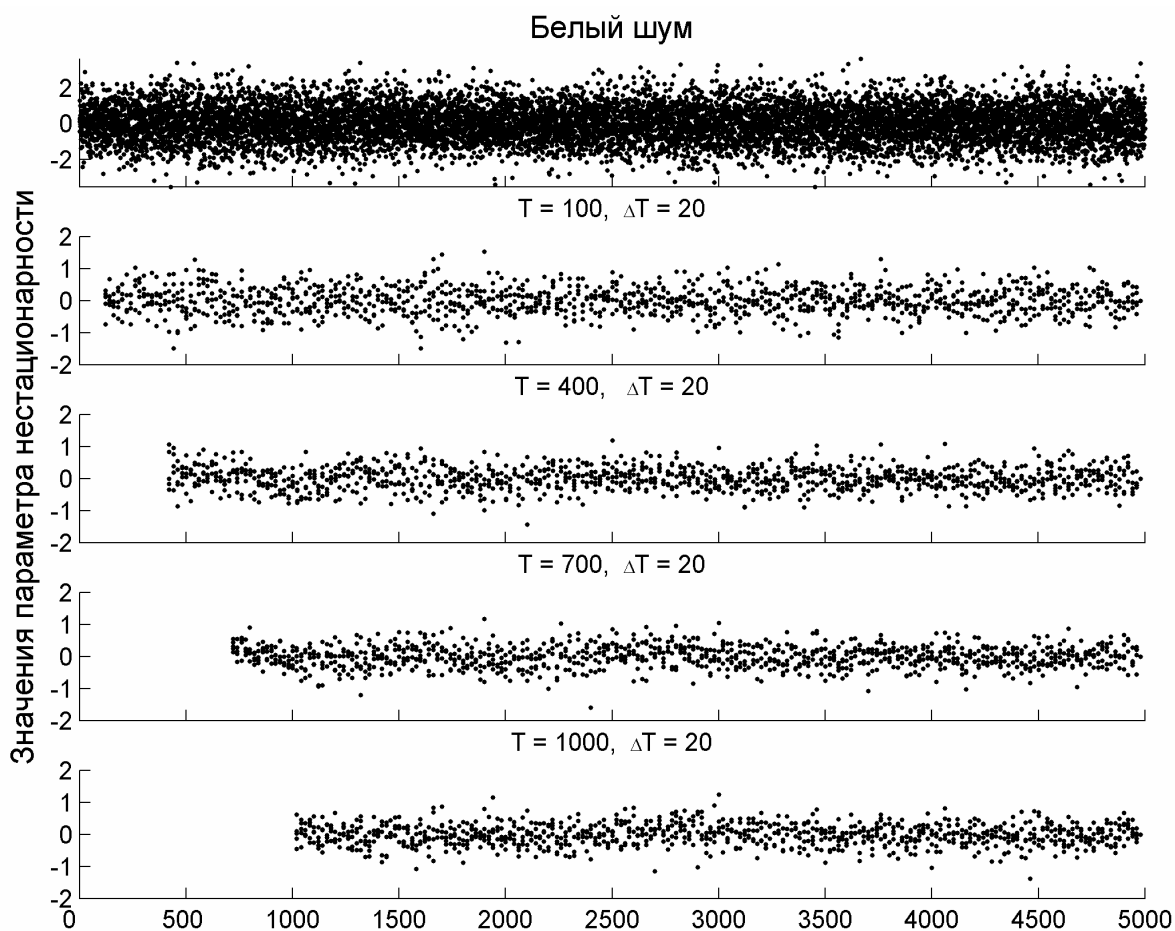


Рис. 2. Диаграмма, иллюстрирующая результаты модельного эксперимента по оценке порогового значения параметра нестационарности. T – величина скользящего окна в сутках, ΔT – интервал последовательного смещения скользящего окна в сутках.

предвестников землетрясений, не гарантирует отсутствия таких ситуаций как "пропуск цели" или "ложная тревога". Однако необходимо заметить, что отсутствие подобных ситуаций не гарантирует ни один из существующих методов прогноза землетрясений, в противном случае, проблема прогноза была бы успешно решена. Несмотря на это, наличие "пропусков цели" и "ложных тревог" вряд ли стоит рассматривать в качестве недостатка метода ФШС. Более того, проявление в исходных временных рядах различного рода нерегулярностей, вероятно, не является обязательным признаком подготовки сильного сейсмического события, а может быть следствием, к примеру, тектонических явлений несейсмической природы (криповых подвижек, распространения фронта деформационных волн, современных движение земной коры неспецифического характера [2]).

Обсуждение результатов

Во введении к данной работе указывалось на одну из ключевых проблем оценки сейсмической опасности по данным гидрогеохимических наблюдений – проблему неопределенности понятия "прогнозный признак". Говорилось также о том, что универсального прогнозного признака, наблюдаемого всяких раз в изменении того или иного гидрогеохимического показателя перед землетрясением, не существует. Это связано, прежде всего, с тем, что состояние самой гидрогеохимической системы может существенно меняться со временем. В связи с этим, понятно, что отклик системы на процессы подготовки и реализации землетрясений в разное время может быть различным. В рамках метода ФШС, в основе которого лежат общие феноменологические представления об эволюции сложных систем, понятия прогнозного признака как такового не вводится. Вместо этого вводится понятие нерегулярностей различного рода, которые могут выступать в качестве показателей структурных перестроек системы на различных уровнях ее иерархической организации. Для выявления нерегулярностей используется достаточно простой критерий – параметр нестационарности, значимые всплески которого свидетельствуют об изменениях в исследуемой динамической системе на данном конкретном масштабном уровне. При этом совершенно неважно, какие физические величины используются в анализе, поскольку все они преобразуются в вариации параметра нестационарности. Это дает возможность количественного сравнения флуктуаций, порождаемых физически разнородными системами, что, очевидно, свидетельствует об универсальности рассматриваемого критерия. Оценка значимости вариаций параметра нестационарности, как было продемонстрировано на простом модельном эксперименте, также не представляет большой проблемы и имеет вполне определенный физический смысл. Таким образом, универсальность критерия – параметра нестационарности и относительная простота оценки его значимости позволяют сделать вывод о том, что всплески вариаций ПН могут рассматриваться как универсальный прогнозный признак изменения состояния исследуемой гидрогеохимической системы, которое может быть связано с процессами подготовки сильного землетрясения. Кроме этого, необходимо отметить максимально формализованный характер процедуры идентификации рассматриваемого прогнозного признака (всплесков параметра нестационарности), что делает возможным алгоритмизацию всей последовательности операций, направленных на оценку сейсмической опасности по данным гидрогеохимических наблюдений, начиная с обращения к базе данных и кончая, собственно, выдачей экспертного заключения.

Авторы с большим удовольствием пользуются возможностью выразить слова благодарности С.Ф. Тимашеву за внимание и ценные замечания к работе.

Список литературы

1. Встовский Г.В., Дещеревский А.В. и др. Поиск электрических предвестников землетрясений методом фликкер-шумовой спектроскопии // Физика Земли. 2005. №7. С. 3–14.
2. Киссин И.Г. Гидрогеологический мониторинг земной коры // Физика Земли. 1993. №8. С. 58–70.
3. Лукк А.А., Дещеревский А.В. и др. Вариации геофизических полей как проявления детерминированного хаоса во фрактальной среде. М., 1996. 210 с.
4. Тимашев С.Ф. Фликкер-шумовая спектроскопия: информация в хаотических сигналах. М.: Физматлит, 2007. 248 с.
5. Шустер Г. Детерминированный хаос. М.: Мир, 1988. 240 с.
6. Timashev S.F., Polyakov Yu.S. Review of flicker noise spectroscopy in electrochemistry // Fluctuation and Noise Letters. 2007. Vol. 7. №2. P. R15-R47.