

УДК 550.343.6

О НОВОЙ ПАРАДИГМЕ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

© 2003 г. А. В. Дещеревский, А. А. Лукк, А. Я. Сидорин

Представлено академиком В.Н. Страховым 25.04.2002 г.

Поступило 06.06.2002 г.

Кризис детерминистской парадигмы прогноза землетрясений способствовал появлению иных, отличных от традиционных взглядов на проблему прогноза землетрясений. В противовес континуальной модели среды в последние годы более широкое признание получила модель среды в виде активной дискретной иерархически структурированной геофизической системы [1–5 и др.]. Основное ее отличие от классической модели – пассивного континуума – состоит в том, что среда может активно перераспределять и выделять запасенную в ней и вновь поступающую энергию. При этом отдельные ее элементы могут быть различно насыщены тепловой, упругой и “структурной” энергией [6]. При дополнительном поступлении энергии извне (например, за счет приливных движений, тектонических подвижек и т.п.) некоторые элементы среды могут достигать состояния неустойчивости и сбрасывать излишек энергии, в свою очередь поглощаемой соседними фрагментами. Происходящие таким образом процессы накопления и перераспределения энергии могут привести к неустойчивости всю систему в целом, что и завершается структурной катастрофой. Из этого следует, что в геофизической среде – системе, поведение которой детерминировано известными физическими законами, – могут развиваться внешне непредсказуемые хаотические процессы, приводящие в итоге к серьезным последствиям.

Идеи об активной роли геофизической среды, противопоставляемые детерминистской концепции, позволяют по-новому подойти к проблеме прогноза землетрясений. На основе анализа экспериментальных данных предложено извлекать прогнозную информацию о динамике эндогенных процессов из хаотических высокочастотных вариаций геофизических параметров, которые ранее были исключены из рассмотрения или отфильтрованы как неинформативные. На основе полученных авторами данных продемонстрированы возможности предложенного подхода и

обоснована необходимость смены “детерминистской” прогнозной парадигмы на парадигму нестационарных флуктуаций геофизических полей.

Анализ показывает, что хаотические вариации различных геофизических параметров, являющиеся носителями информации о подобных хаотических процессах, часто могут быть отождествлены с таким природным явлением, как фликкер-шум. После очистки этих вариаций от регулярной сезонной компоненты их принадлежность к классу фликкер-шума не вызывает сомнений [5, 7–8]. На рис. 1а приведены примеры временных рядов геофизических величин, мониторинг которых осуществлен на Гармском полигоне (Таджикистан) с достаточно высокой частотой опроса (сутки и часы). Фликкер-шумовую структуру этих рядов подтверждают приведенные на рис. 1б их амплитудные спектры, рассчитанные по реализациям, отфильтрованным от сезонной составляющей.

Для всех рассмотренных реализаций амплитудный спектр может быть аппроксимирован степенной функцией $A \sim f^{-k}$, где A – квадратный корень из амплитуды спектра мощности; f – частота, а параметр спектра k колеблется в диапазоне $0.5 \leq k \leq 1.0$. Степенная асимптотика спектра, свойственная фликкер-шуму (для “белого” шума $k = 0$), указывает на существование связи между текущей динамикой системы и прошлыми событиями в ней.

Такая статистическая структура вариаций геофизических полей имеет существенное значение для выбора адекватных методик анализа геофизических данных. Так, некорректными оказываются оценки и методики, явно или косвенно предполагающие стационарность сигнала, например использование коэффициента корреляции и др. Отсюда, в частности, следует категорическая недопустимость использования стандартных формул для доверительных интервалов, что, например, приводит к завышению уровня значимости на порядки при попытках оценки коэффициента корреляции между фликкер-шумовыми рядами. Именно это обстоятельство обуславливает актуальность разработки специальных приемов и методов статистического анализа геофизических

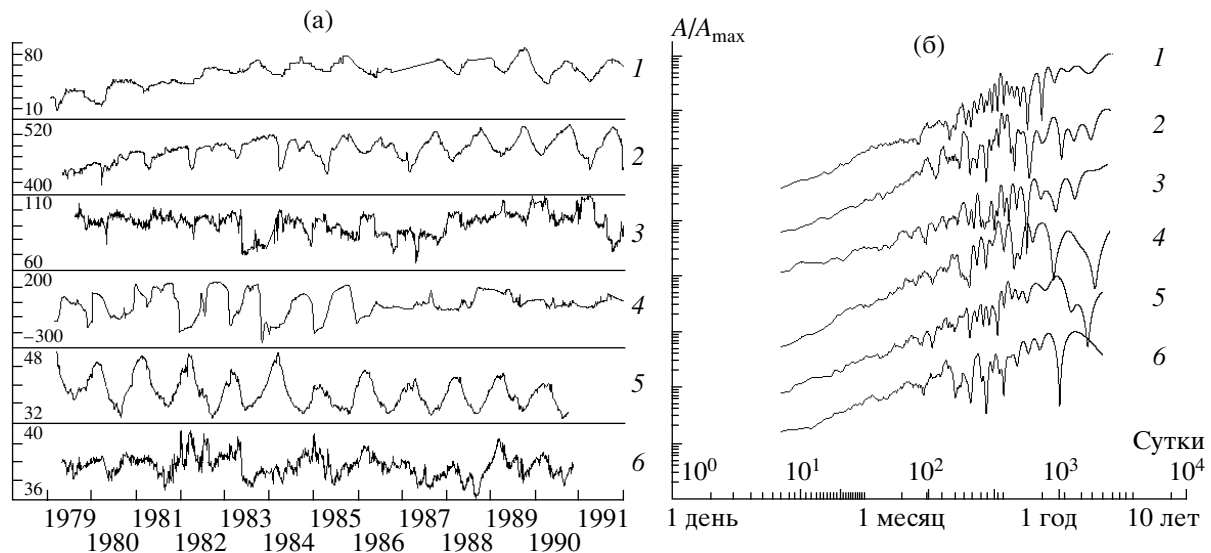


Рис. 1. Временные ряды геофизических параметров (а) с частотой опроса не реже, чем раз в сутки, и их нормированные на максимальную амплитуду спектры этих рядов, очищенных от сезонной компоненты (б). 1 – уровень воды в р. Хазор-Меч (см); 2 – потенциал (мВ) электродной пары медь-свинец (ЭХП) на центральной обсерватории Гарм; 3 – электропроводность воды в р. Хазор-Меч (См · м); 4 – потенциал (мВ) электротеллурического поля (ЭТП) на разnose 150 м (там же); 5 – кажущееся электрическое сопротивление (ρ_k , Ом · м), измеренное методом вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) на установке $AB = 12$, $MN = 2$ м (там же); 6 – кажущееся электрическое сопротивление (ρ_k , Ом · м), измеренное методом ВЭЗ на установке $AB = 130$, $MN = 40$ м (там же).

временных рядов, учитывающих накопленные данные о статистической структуре наблюдаемых вариаций.

Более адекватным представляется формализованный поиск во временных рядах геофизического мониторинга широкого спектра нестационарностей и коллективных эффектов различного рода. Многообещающе в этом плане выглядят следующие подходы, активно развиваемые в последнее время: методы, базирующиеся на идеях отслеживания параметров, характеризующих самоподобные, скейлинговые свойства изучаемых сигналов и их изменение во времени [9–11]; методы изучения временных изменений статистической структуры динамических процессов с применением различного рода параметризаций наблюдаемого сигнала [12]; метод построения агрегированного сигнала, комплексующего в себе особенности коллективного поведения многих компонент многомерного временного ряда [13]; метод фликкер-шумовой спектроскопии [14].

Суть всех этих методов в конечном итоге состоит в построении различного рода интегральных показателей (прогнозных критериев) на варьируемых временных интервалах усреднения. При таком усреднении происходит потеря информации о краткосрочных несущественных факторах, но зато накапливается информация о сравнительно медленной динамике основного эндогенного процесса, приводящего к необратимым

“катастрофическим” изменениям состояния активной геодинамической среды.

Подобный подход к анализу стохастических серий временных вариаций геофизических величин подразумевает смену парадигмы прогнозных исследований. Основу новой парадигмы должно составить извлечение прогнозной информации о динамике эндогенных процессов из высокочастотных флуктуаций временных реализаций геофизических параметров. Ранее эти флуктуации считались неинформативным шумом, поскольку их ярко выраженный нестационарный характер не укладывался в рамки господствующих детерминистских представлений. Поэтому при проектировании систем прогностических наблюдений не принималось мер по созданию аппаратно-методического обеспечения, позволявшего регистрировать и использовать эту информацию.

Тем не менее даже в полученных ранее данных можно отыскать примеры наблюдения информативных высокочастотных флуктуаций тех или иных параметров. Подобный пример приведен на рис. 2, отражающем результаты анализа временных последовательностей чисел микроземлетрясений ($M \geq 1$). Зарегистрированы сейсмические события в радиусе около 10 км вокруг сейсмической станции. Используются все станции Гармского полигона с долей пропусков данных менее 2% – всего 9 станций, расположенных на площади $\sim 100 \times 60$ км в зоне сочленения Памира и Тянь-Шаня.

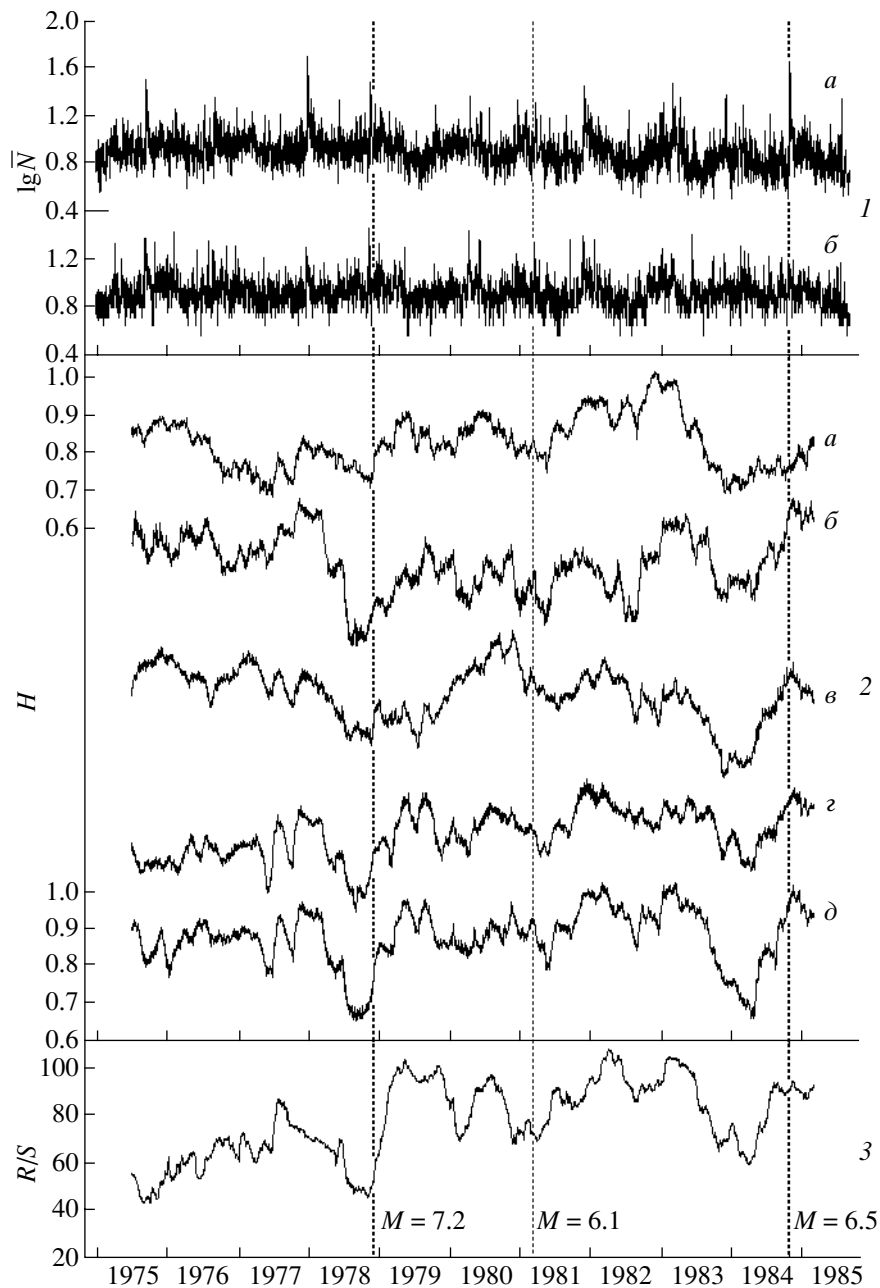


Рис. 2. Результаты R/S анализа временных рядов чисел микроземлетрясений в ближайшей окрестности 9 пунктов наблюдений на Гармском геофизическом полигоне: 1 – осредненный по 9 исходным (а) и один из исходных (б) временные ряды логарифмов чисел микроземлетрясений ($\lg \bar{N}$); 2 – расчетные ряды показателя Херста (а–в – примеры расчетов для трех индивидуальных рядов $\lg N$, г – расчет для осредненного ряда $\lg \bar{N}$, д – осредненный ряд расчетов показателя Херста по 9 индивидуальным исходным рядам $\lg N$); 3 – расчетный ряд величины R/S для осредненного ряда $\lg \bar{N}$.

На рис. 2 (кривая 1а) представлены осредненные по всем 9 станциям логарифмы чисел микроземлетрясений. Рисунок полностью отражает структуру вариаций исходных индивидуальных реализаций, один пример которых приведен на рис. 2 (кривая 1б). Для осредненных и индивидуальных логарифмов чисел микроземлетрясений рассчитывали временной ход параметра R/S

(отношение накопленного размаха к стандартному отклонению) и показателя Херста H. Оценку данных параметров выполняли в скользящем временном окне шириной 1 год, как для индивидуальных рядов логарифмов чисел микроземлетрясений (например, 2а–в на рис. 2), так и для аналогичного ряда осредненных по всем 9 станциям значений (2г на рис.2), а также строили осреднен-

ный по всем 9 станциям ряд вычисленных значений показателя H ($2d$ на рис. 2). Для расчета значений статистик R/S и H использовали стандартные алгоритмы, подробно описанные в [15].

Несмотря на полное отсутствие каких-либо заметных достаточно длительных во времени синхронных изменений в исходных рядах, в результате обработки на всех вычисленных рядах значений R/S и показателя H уверенно выделены синхронные “бухтообразные” вариации. Они приурочены к 1978–1979 гг. и 1983–1984 гг. При сопоставлении этих вариаций с моментами трех сильнейших землетрясений ($M = 6.1$ – 7.2), имевших место в пределах северо-восточной оконечности Гармского полигона (Джиргатальское, $M = 6.5$) и приблизительно в 150 км к востоку от нее (Алайские, $M = 6.1$ и $M = 7.2$), можно сделать вывод, что обсуждаемые вариации могли быть обусловлены процессами подготовки Джиргатальского землетрясения и удаленного, но более сильного Алайского землетрясения с $M = 7.2$. Причем эффект от первого оказывается более ярко выраженным, по-видимому, в силу его близости к пунктам регистрации микроземлетрясений. Более слабое Алайское землетрясение 1981 г. ($M = 6.1$), с существенно меньшей интенсивностью, чем первое Алайское землетрясение 1978 г. ($M = 7.2$), практически не проявилось в вариациях величин R/S и H . По-видимому, его влияние на режим микроземлетрясений Гармского полигона оказывается несущественным в силу удаленности и недостаточной интенсивности этого события. Подчеркнем, что начальные участки обсуждаемых вариаций определяются данными, полученными до момента сильного события, и поэтому могут рассматриваться как предвестники землетрясений. Тем самым можно говорить о перспективности предлагаемого подхода к поиску предвестников землетрясений в флуктуационной составляющей вариаций геофизических величин.

Представленный подход к анализу стохастических серий временных вариаций геофизических величин не только не вытекает из детерминистских моделей сейсмического процесса, но и в известной степени им противоречит. Однако в этом противоречии кроется возможность получения качественно новой информации. Выявляются та-

кие особенности экспериментальных временных рядов, которые принципиально игнорировались в рамках традиционных методов.

Изложенные представления могут стать основой новой парадигмы исследований по прогнозу землетрясений – парадигмы нестационарных флуктуаций геофизических полей.

Работа поддержана грантом РФФИ № 02–05–64340 и грантом научного и технологического сотрудничества НАТО–Россия (№ 978210).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Садовский М.А. // ДАН. 1979. № 247. № 4. С. 829–831.
2. Садовский М.А., Голубева Т.В., Писаренко В.Ф., Шнирман М.Г. // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1984. № 2. С. 3–15.
3. Scholz C.H. In: Spontaneous Formation of Space-Time Structures and Criticality. Dordrecht: Kluwer. 1991. P. 41–56.
4. Turcotte D.L. In: Fractals and Dynamic Systems in Geoscience. В.; Heidelberg; N.Y.: Springer, 1994. P. 7–23.
5. Лукк А.А., Децереvский А.В., Сидорин А.Я., Сидорин И.А. Вариации геофизических полей как проявление детерминированного хаоса во фрактальной среде. М.: ОИФЗ РАН, 1996. 210.
6. Тимашев С.Ф. // ДАН. 1984. Т. 279. № 6. С. 1407–1410.
7. Децереvский А.В., Лукк А.А., Сидорин А.Я. // Изв. РАН. Физика Земли. 1997. № 7. С. 3–19.
8. Descherevsky A.V., Lukk A.A., Sidoren A.Ya. // Phys. Chem. Earth A. 2000. V. 25. № 12. P. 775–779.
9. Hardy Mc.I., Czerny B. // Nature. 1987. V. 325. P. 696–698.
10. Higuchi T. // Physica D. 1998. V. 31. P. 277–283.
11. Стаховский И.П. // ДАН. 1996. Т. 350. № 3. С. 393–396.
12. Децереvский А.В., Сидорин А.Я. // Федеральн. система сейсмол. наблюдений: Инф.-аналит. бюл. 1996. Т. 3. № 3. С. 11–27.
13. Любушин А.А. // Изв. РАН. Физика Земли. 1998. № 3. С. 69–74.
14. Тимашев С.Ф. // ЖФХ. 2001. Т. 75. № 10. С. 1900–1908.
15. Децереvский А.В. Фрактальная размерность, показатель Херста и угол наклона спектра временно-го ряда. М.: ОИФЗ РАН, 1997. 36 с.