

ПРОГНОЗ ГЕОМАГНИТНОЙ И СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА ОСНОВЕ НЕЛОКАЛЬНЫХ КОРРЕЛЯЦИЙ

С.М. Коротаев, В.О. Сердюк, Ю.В. Горохов

Представлено академиком В.Н. Страховым 13.11.2006

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию возможности долгосрочного прогнозирования случайной компоненты геомагнитной и солнечной активности на основе эффекта макроскопической нелокальности. Предлагается алгоритм прогноза, использующий данные измерений детекторов нелокальных корреляций. Его работоспособность доказывается на материалах длительных экспериментов в режиме имитации реального прогноза с заблаговременностью до четырех месяцев.

Все используемые ныне методы прогноза геомагнитной активности оперируют с ее составляющими, детерминированными внешними факторами и собственной эволюцией (даже если при этом используются статистические подходы). Однако случайная (спонтанная) составляющая весьма существенна. Это связано с тем, что прогнозируемая система является сложной в синэнергетическом смысле, типичной чертой которой является неустойчивость, обусловленная расходимостью траекторий в фазовом пространстве. Для краткосрочных геомагнитных прогнозов это не слишком важно, т.к. внешние факторы – солнечная активность и состояние межпланетной среды - уже заданы наблюдениями. Поэтому непредсказуемость многих проявлений солнечной активности, например, вспышек, не имеет значения. Но для долгосрочных прогнозов, которые в явном или неявном виде опираются на прогноз солнечной активности, случайная компонента сопоставима с детерминированной (и превышает ее для катастрофических событий). Таким образом, невозможность учета случайной состав-

ляющей снижает достижимую точность и заблаговременность прогнозов.

Принципиальную возможность прогноза случайной компоненты дает недавно обнаруженный эффект макроскопической нелокальности, природа которого, по-видимому, заключается в выходе квантовых корреляций, формируемых диссипативными процессами [1, 2], на макроуровень [3], и который проявляется в корреляциях таких процессов без посредства локальных носителей. Уравнение макроскопической нелокальности [4-7], основанное на транзакционной интерпретации нелокальных корреляций [8], связывает производства энтропии в пробном процессе и процессе-источнике с симметричным запаздыванием и опережением. Это означает, для случайных процессов, возможность наблюдения необычных опережающих корреляций. Более того, вследствие меньшей эффективности поглощения промежуточной средой опережающего электромагнитного поля Уилера-Фейнмана [9] опережающие корреляции могут превышать запаздывающие.

В обширной серии геофизических экспериментов [4-7, 9-14] эти особенности макроскопических нелокальных корреляций были подтверждены. В качестве детекторов таких корреляций использовались лабораторные пробные спонтанные процессы в условиях исключения всех возможных локальных воздействий (вариаций температуры и пр.). Наибольший объем материала получен с детекторами, основанными на процессе спонтанных вариаций собственных потенциалов морских слабополяризующихся электродов в электролите (теория детекторов, их конструкция и параметры описаны в [4-6, 10]). Наиболее интересные результаты получены при изучении связи пробных процессов с различными гелиогеофизическими процессами с большой случайной составляющей, в особенности, с геомагнитной (характеризуемой индексом Dst) и солнечной (характеризуемой потоком радиоизлучения R) активностью. В последнем случае было обнаружено что в диапазоне 9 стандартных частот (245 – 15400 $MГц$) наибольшая кор-

реляция с сигналами детекторов наблюдается в полосе 610 – 2800 МГц, т.е. с некоторым смещением относительно обычно используемой при изучении солнечно-земных связей волны 10,7 см (2800 МГц). Для подавления автокорреляции из данных удалялись общеизвестные детерминированные (периодические) компоненты путем полосовой или низкочастотной предфильтрации. В получаемой после этого кросс-корреляционной функции индекса активности (*Dst* или *R*) и сигнала детектора опережение главного максимума оказалось велико (33-130 суток), а его уровень достаточно высок (0,5-0,9). Это позволило, путем сдвига реализаций, продемонстрировать возможность прогноза случайной компоненты солнечной и геомагнитной активности по сигналу детектора [6, 7, 10–14].

Но для реального прогноза такой простейший метод непригоден, поскольку, во-первых, процессы далеки от δ -коррелированных, поэтому большие погрешности неизбежны; во вторых, положение корреляционного максимума нестабильно из-за нестационарности процессов и использовать его как меру сдвига реализаций можно только для апостериорной демонстрации.

Для решения реальной задачи разработан алгоритм, основанный на свертке импульсной переходной характеристики с множеством предыдущих значений сигнала детектора. На «обучающем» интервале $[t_1, t_n]$ вычисляется импульсная переходная характеристика $g(\tau)$, которая связывает сигнал детектора X и прогнозируемый параметр (индекс активности) Y с заблаговременностью $\Delta t = t - t_n$, из решения уравнения свертки:

$$Y(t) = \int_{t_1}^{t_n} g(\tau) X(t - \tau) d\tau. \quad (1)$$

Решение уравнения (1) в дискретном виде сводится к решению системы линейных уравнений $\{Y=XX\}$. Компоненты вектора K отвечают коэффициентам множественной кроссрегрессии (в случае нор-

мального распределения). Число уравнений n равно заблаговременно-сти прогноза. X – квадратная матрица $n \times n$, строки которой формируются из значений сигнала детектора на обучающем интервале. Первая строка содержит значения с временным индексом от 1 до n , вторая – от 2 до $n+1$, и т.д. Последовательные значения Y ставятся в соответствие каждой строке матрицы. Система решается методом Гаусса. Устойчивость результатов достигается путем оптимальной регуляризации. Практически заблаговременность выбирается равной ожидаемому среднему положению корреляционного максимума. Полный обучающий интервал Y заканчивается последним наблюдаемым значением, X – предшествующим на Δt .

Найденная таким путем переходная характеристика далее используется для вычисления только одного значения прогнозируемого параметра Y с заблаговременностью Δt . Для этого решается прямая задача (1) по интервалу X , заканчивающемуся последним наблюдаемым значением. На следующий день обучающий интервал сдвигается вперед на один сутки и прогнозируется следующее значение Y . Такая процедура позволяет минимизировать влияние нестационарности. Подавление остаточной неустойчивости достигается оптимальной пост-фильтрацией.

Этот метод предпочтительнее часто применяемого в аналогичной ситуации (неопределенности максимума кросскорреляционной функции) метода множественной регрессии на основе расчета корреляционной матрицы, поскольку в предлагаемом методе не требуется дополнительных предположений о вероятностном распределении. Это существенно, так как распределение редко является собственным, что требуется для единственности традиционного решения регрессионной задачи, и далеко не всегда является нормальным, что требуется для соответствия этого решения критерию максимального правдоподобия.

Для испытания метода в режиме имитации реального прогноза использованы все полученные данные натуральных экспериментов с де-

текторами нелокальных корреляций длительностью ежечасных измерений не менее двух лет [7, 11-14]. Таких рядов оказалось два (оба с электродными детекторами). Результаты серий ежедневных прогнозов (длительность которых меньше исходных рядов за счет соответствующей предфильтрации и использования начального отрезка как обучающего) сравнивались с фактической эволюцией Dst и R . Качество оценивалось среднеквадратическим отклонением кривых ε в абсолютных единицах – $nTл$ для Dst и $10^{-22} Bm м^{-2} Гц^{-1}$ для R . Оптимальная постфильтрация во всех случаях имела период пропуска $T > 14 сут.$

Исходя из вышеописанного алгоритма, каждая точка приводимых далее прогностических кривых является результатом расчета по выборке наблюдательных данных, минимальный объем которых определяется заблаговременностью прогноза (определяющей длительность обучающего интервала) и параметрами фильтров. Подчеркнем, что прогнозируется только долгопериодная случайная составляющая, т.е. прогноз является фоновым, хотя сам по себе эффект нелокальности допускает прогноз индивидуальных мощных событий [11].

На рис. 1 показан геомагнитный прогноз по первому (и самому длительному) ряду. Исходные данные подвергались предфильтрации с полосой пропуска $28 < T < 364 сут.$ Заблаговременность прогноза $\Delta t = 35 сут.$, погрешность $\varepsilon = 1.7$. Без постфильтрации $\Delta t = 42 сут.$, но $\varepsilon = 2.4$.

На рис. 2 показан солнечный прогноз по тому же ряду. Предфильтрация $T > 28 сут.$ Заблаговременность та же, $\Delta t = 35 сут.$, погрешность $\varepsilon = 0.88$. Без постфильтрации $\Delta t = 42 сут.$, $\varepsilon = 1.16$.

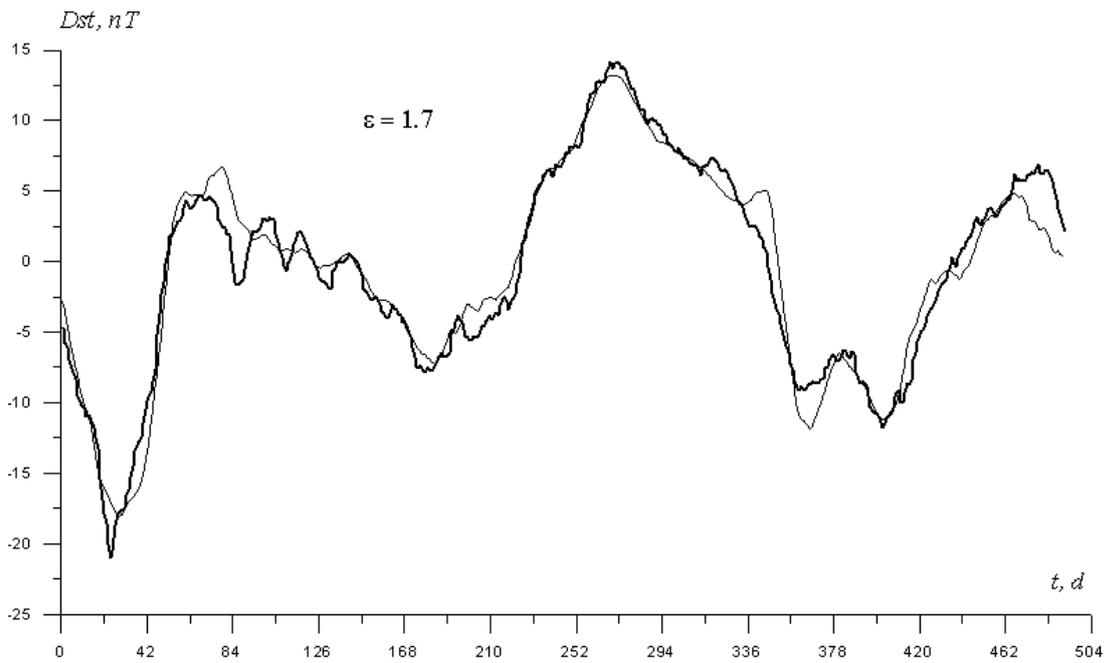


Рис. 1. Прогноз геомагнитной активности с заблаговременностью 35 сут. (тонкая линия) в сравнении с фактической кривой (жирная линия). Начало отсчета времени (в сутках) 19/09/1995.

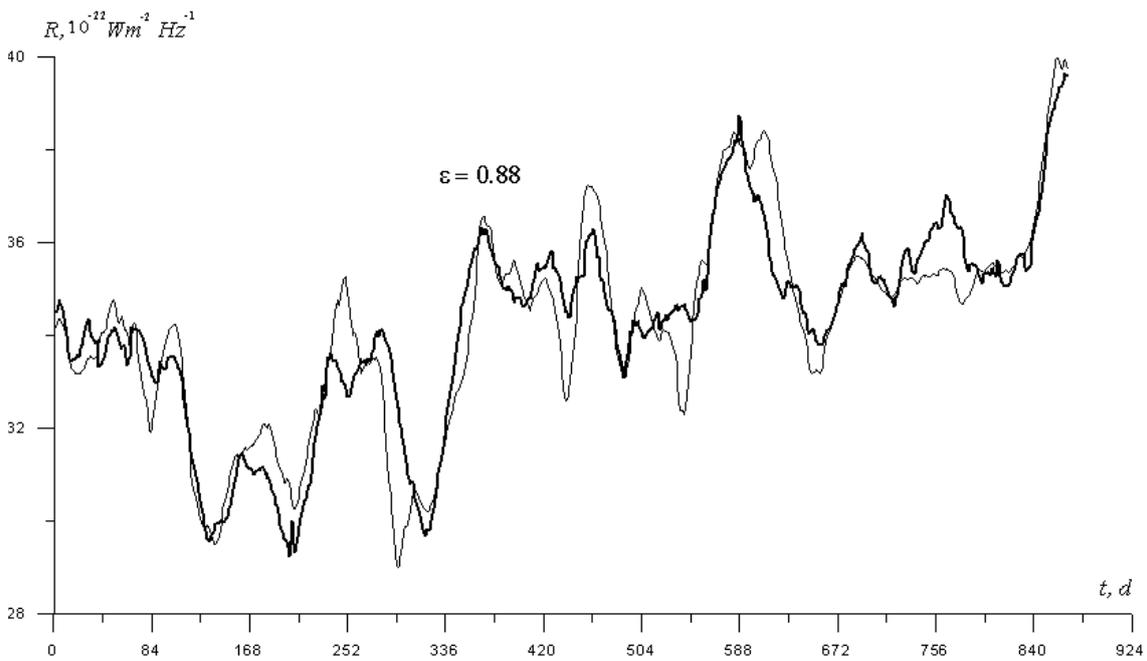


Рис. 2. Прогноз солнечной активности с заблаговременностью 35 сут. в сравнении с фактической кривой. Начало отсчета времени 20/3/1995.

На рис. 3 представлен геомагнитный прогноз по второму ряду (данные последнего эксперимента, показавшие наличие нелокальных корреляций с наибольшим опережением [13, 14]). Предфильтрация $28 < T < 183$ сут. Заблаговременность $\Delta t = 123$ сут, $\varepsilon = 2.9$. Без постфильтрации: $\Delta t = 130$ сут, $\varepsilon = 3.5$.

На рис. 4 показан солнечный прогноз по тому же ряду, что и для случая рис. 3. Предфильтрация та же, $\Delta t = 123 \text{ сут}$, $\varepsilon = 2.0$. Без постфильтрации $\Delta t = 130 \text{ сут}$, $\varepsilon = 2.4$.

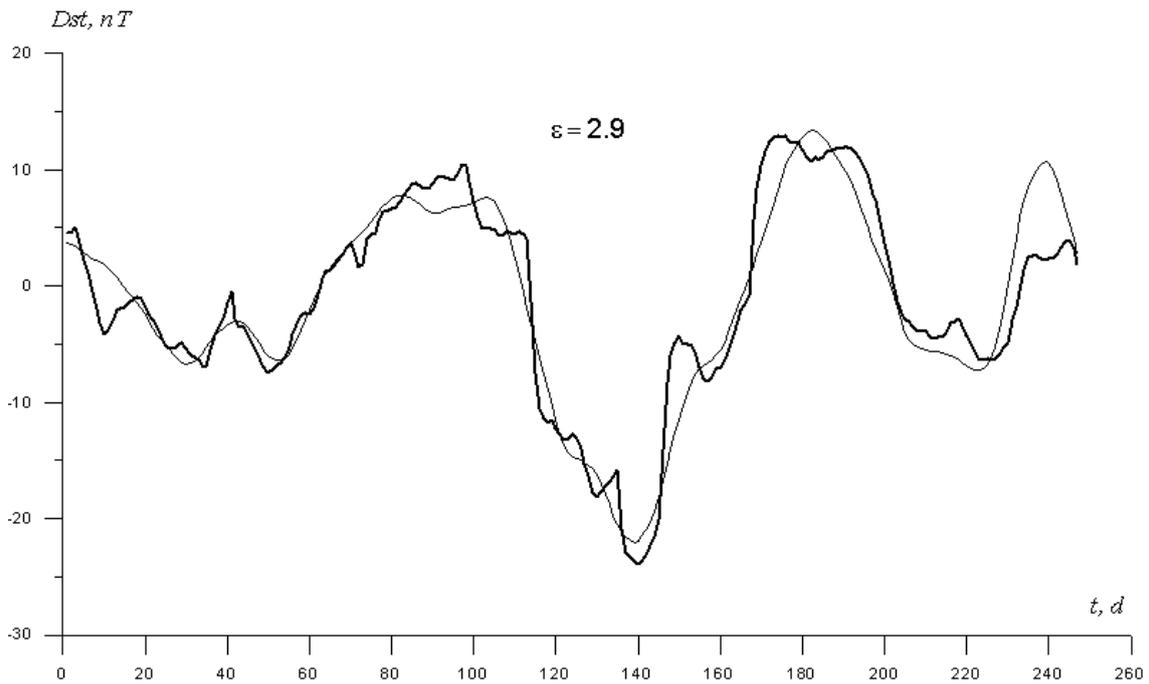


Рис. 3. Прогноз геомагнитной активности с заблаговременностью 123 сут. в сравнении с фактической кривой. Начало отсчета времени 20/2/2003.

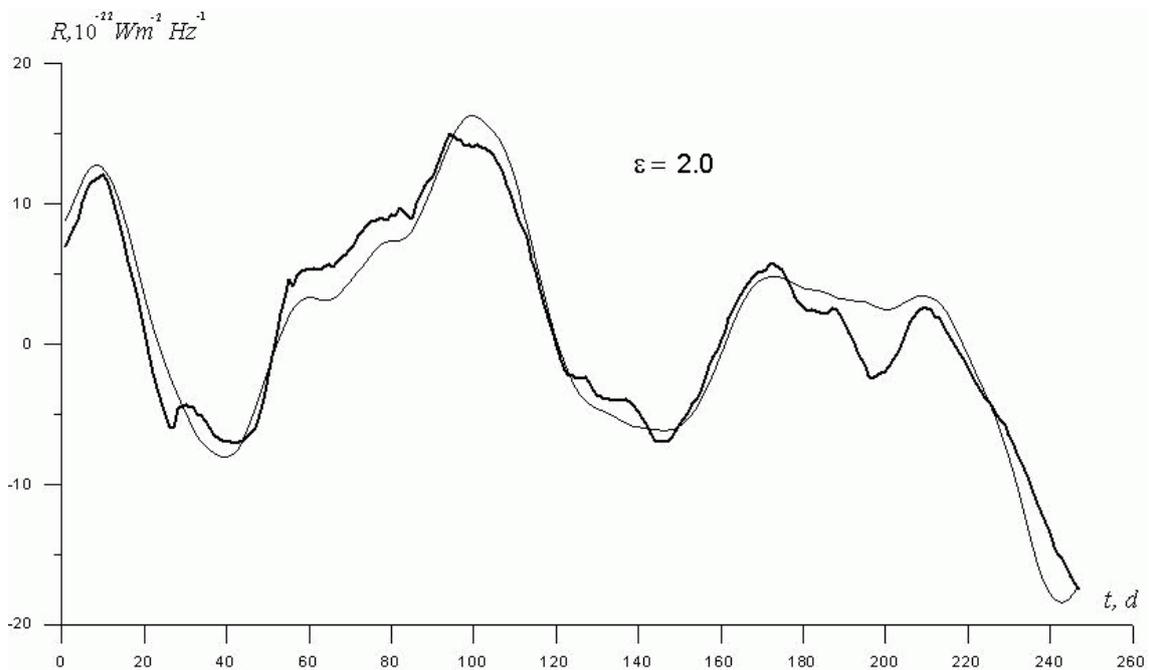


Рис. 4. Прогноз солнечной активности с заблаговременностью 123 сут. в сравнении с фактической кривой. Начало отсчета времени 20/2/2003.

Таким образом, использование нелокальных корреляций позволяет осуществить фоновый долгосрочный прогноз геомагнитной и солнечной активности с приемлемой для всех практических целей

точностью. Вероятно, эта идея может быть применена и для прогноза диссипативных процессов с большой случайной составляющей в других геосферах, например, сейсмической активности.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 05-05-64032).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Jakobczyk L.* // J. Phys. A. 2002. V. 35. P. 6383–6391.
2. *Benatty F., Floreanini R., Piani M.* // Phys. Rev. Lett. 2003. V. 91. P. 070402-1–4.
3. *Home D., Majumdar A.S.* // Phys. Rev. A. 1995. V. 52, P. 4959–4962.
4. *Korotaev S.M., Serdyuk V.O., Sorokin M.O., Abramov J.M.* // Physics and Chemistry of the Earth A. 1999. V. 24. P. 735–740.
5. *Коротаев С.М., Сердюк В.О., Сорокин М.О.* // Геомагнетизм и аэрономия. 2000. Т. 40. №3. С. 56–64.
6. *Korotaev S.M., Morozov A.N., Serdyuk V.O., Gorohov J.V.* In: Physical Interpretation of Relativity Theory. Moscow: BMSTU Press, 2003. P. 200–212.
7. *Korotaev S.M., Serdyuk V.O., Nalivayko V.I., Novysh A.V., Gaidash S.P., Gorohov J.V., Pulinets S.A., Kanonidi Kh. D.* // Physics of Wave Phenomena. 2003. V.11. N.1. P.46–54.
8. *Cramer J.G.* // Rev.Mod. Phys. 1986. V. 58. P. 647–688.
9. *Hoyle F., Narlikar J.V.* // Rev. Mod. Phys. 1995. V. 67. N 1. P. 113–156.
10. *Коротаев С.М., Морозов А.Н., Сердюк В.О., Сорокин М.О.* // Известия высших учебных заведений Физика. 2002. №5. С. 3–14.
11. *Korotaev S.M., Serdyuk V.O., Gorohov J.V., Pulinets S.A., Machinin V.A.* // Frontier Perspectives. 2004. V.13. N 1. P. 41–45.
12. *Korotaev S.M., Morozov A.N., Serdyuk V.O., Nalivayko V.I., Novysh A.V., Gaidash S.P., Gorohov J.V., Pulinets S.A., Kanonidi Kh. D.* // VESTNIK Journal of Bauman Moscow State Technical University. 2005. P.173–185.
13. *Korotaev S.M., Morozov A.N., Serdyk V.O., Gorohov J.V., Machinin V.A.* // NeuroQuantology. 2005. V. 3. P. 275–294.
14. *Korotaev S.M., Morozov A.N., Serdyuk V.O., Gorohov J.V., Machinin V.A.* In: Physical Interpretation of Relativity Theory. Moscow: BMSTU PH, 2005. P. 209–215.