

ПРОГНОЗ ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА МАКРОСКОПИЧЕСКОЙ НЕЛОКАЛЬНОСТИ

С.М. Коротаев¹, В.О. Сердюк¹, Ю.В. Горохов²

¹*Центр геоэлектромагнитных исследований Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН*

²*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН*

Эффект макроскопической нелокальности проявляется как корреляция необратимых процессов без каких-либо локальных носителей взаимодействия. Для случайных процессов это не только запаздывающая корреляция, что естественно, но и опережающая. Длительный эксперимент по мониторингу крупномасштабных природных процессов с большой случайной составляющей с помощью детекторов, содержащих изолированные пробные процессы, показал наличие опережающих корреляций. Результаты эксперимента позволяют поставить задачу использования нелокальных корреляций для прогноза некоторых естественных процессов. Эта задача была решена на примере серии долговременных прогнозов солнечной и геомагнитной активности.

1. Введение

Каждый естествоиспытатель, не ограничивающийся рамками своей узкой специализации и не проходящий мимо универсальных физических проблем, задумывается о согласовании обратимости времени в основных физических теориях и явной, можно сказать, вопиющей необратимости времени в реальном мире. Оригинальный подход был предложен Н.А. Козыревым в концепции причинной механики [1-4]. Несмотря на то, что главный постулат причинной механики – фундаментальная необратимость времени – кажется естественным, логические и экспериментальные выводы оказались настолько неожиданными, что в целом встретили негативную реакцию. Причиной этого были также сомнения в чистоте экспериментов и недостаточно формализованная теория. После Козырева некоторые из его экспериментов были успешно воспроизведены в других лабораториях (например, [5-7]), но неопределенность формулировки проверяемой гипотезы осталась, равно как и недостаточная строгость экспериментов.

Один из главных выводов причинной механики говорит о том, что асимметричное (необратимое) время – активная субстанция, через которую реализуется универсальное нелокальное взаимодействие диссипативных процессов любой природы, и это взаимодействие имеет как запаздывающую, так и опережающую составляющие. Опережающая составляющая дает возможность, в некотором смысле, наблюдать будущее как существующую реальность. Этот вывод, поразителен сам по себе и логически парадоксален, поскольку следует из главного постулата, который радикально утверждает необратимость времени.

В последнее десятилетие идеи Козырева были развиты в связи с двумя новыми направлениями квантовой механики: транзакционной интерпретацией нелокальности [8] и выходом нелокальных квантовых корреляций на макроуровень [9]. Хотя последовательной теории еще не создано, понимание эффектов причинной механики, как проявления квантовой нелокальности на макроуровне, позволило поставить достаточно строгие эксперименты, демонстрирующие наличие опережающих корреляций [10-18].

В статье обсуждаются результаты экспериментов по изучению транзакции крупномасштабных случайных процессов в обратном времени. Во 2 и 3 разделах мы кратко описываем теоретические и экспериментальные разработки последних лет, согласующиеся с существованием макроскопической нелокальной корреляцией, которые обосновывают возможность прогноза некоторых естественных (в частности, солнечных и геомагнитных) процессов. В разделе 4 показан практический алгоритм такого прогноза. В разделе 5 представлены главные результаты – первая реализация на практике прогноза солнечных и геомагнитных процессов на основе эффекта макроскопической нелокальности. В разделе 6 сформулированы основные выводы.

2. Теоретическое обоснование

В начале 90-х гг. аксиомы причинной механики, включая само понятие причинности, были успешно формализованы [19]. Метод причинного анализа был проверен на различных экспериментальных данных (например, [20-24]). Сущность формализма следующая.

Для любых переменных X и Y через условные $H(X|Y)$, $H(Y|X)$ и безусловные $H(X)$, $H(Y)$ шенноновские энтропии определяется пара функций независимости:

$$i_{Y|X} = H(Y|X) / H(Y), \quad i_{X|Y} = H(X|Y) / H(X), \quad 0 \leq i \leq 1. \quad (1)$$

Значения i характеризует однозначную независимость переменных. Например, если $i_{X|Y} = 0$, то X однозначно зависит от Y , если $i_{X|Y} = 1$, то X и Y независимы. Грубо говоря,

функции независимости ведут себя обратно корреляционной функции (точнее, таким аналогом является $(1-i_{Y|X})(1-i_{X|Y})$). Однако, в отличие от корреляционной функции, функции независимости одинаково подходят к любому типу связи (линейной или нелинейной) величин X и Y , но главное в том, что они отражают асимметрию, характерную для причинно-следственной связи. Это позволяет ввести функцию причинности γ :

$$\gamma = i_{Y|X} / i_{X|Y}, \quad 0 \leq \gamma < \infty, \quad (2)$$

и определить причину Y и следствие X как переменные, для которых $\gamma > 1$. Если $\gamma < 1$, то наоборот, X – причина, а Y – следствие. Случай $\gamma = 1$ соответствует адиабатической (непричинной) связи X и Y . Принцип запаздывания причины относительно следствия вводится в таком случае как необходимое условие локальной связи X и Y . Этот принцип (аксиома):

$$\gamma > 1 \Rightarrow \tau = t_Y - t_X < 0 \quad (3)$$

соответствует принципу локальной, или сильной [25] причинности.

Описанный подход является классическим. Он может быть также обобщен на три и более переменных (причинная сеть) [22].

Основной константой причинной механики [1] является псевдоскаляр $c_2 = ae^2 / \hbar$ (a – безразмерная константа), называемая ходом времени, которая является скоростью причинно-следственного перехода на уровне элементарного звена. Примечательно, что значение c_2 было определено при помощи макроскопического эксперимента с возбужденным гироскопом [1] (близкое значение следует и из другого эксперимента с гироскопом [7]). В полуклассическом причинном анализе [19] ход времени не является константой:

$$c_2 = \frac{e^2}{\hbar} \frac{(1-i_{Y|X})(1-i_{X|Y})}{i_{X|Y} - i_{Y|X}}. \quad (4)$$

Так как $c_2 < 0 \Rightarrow \gamma > 1$, $c_2 > 0 \Rightarrow \gamma < 1$, $c_2 \rightarrow \pm\infty \Rightarrow \gamma \rightarrow 1$, можно использовать c_2 вместо γ для того чтобы определить направление причинной связи.

В случае квантомеханического причинного анализа шенноновские энтропии в уравнении (1) должны быть заменены фон-неймановскими. Так как условная энтропия может быть отрицательной, $-1 \leq i \leq 1$ и $-\infty < \gamma < \infty$. В частности, чистому запутанному состоянию соответствует $i_{Y|X} = i_{X|Y} = -1$. На квантомеханическом уровне значение γ недостаточно для различения причины и следствия. Но мы можем различать их с помощью c_2 ; например, если $c_2 < 0$, то Y является причиной, а X – следствием.

Однако, даже если X и Y связаны посредством нелокальной квантовой корреляции, мы можем анализировать только классический результат измерений, поэтому условная

энтропия не должна быть отрицательной. В таком случае определение причинности через γ остается пригодным, но явление квантовой нелокальности удовлетворяет только принципу слабой причинности, согласно которому следствие X должно быть запаздывающим относительно причины Y , если процесс Y контролируется (инициируется) наблюдателем [25]. Если же Y – неконтролируемый (случайный) процесс, тогда опережение X относительно Y допустимо.

Таким образом, вычисляя по экспериментальным данным $i_{X|Y}$ и $i_{Y|X}$ как функцию временного сдвига τ , по их минимуму можно найти оптимальный временной сдвиг, соответствующий связи X и Y . Далее, оценивая значение γ относительно 1, можно установить направление причинной связи. В случае, если Y заведомо является причиной, а X следствием (например, X – сигнал детектора, а Y – сигнал какого-либо процесса-источника), тогда для любого классического взаимодействия минимум $i_{X|Y}$ будет наблюдаться только при $\tau < 0$, и этот минимум будет соответствовать максимуму $\gamma > 1$. Только при нелокальной связи X и Y возможно $\gamma > 1$ при $\tau > 0$.

Козырев предсказал теоретически (правда, только на качественном уровне) наличие корреляции любых диссипативных процессов как следствие асимметрии времени, без каких-либо локальных носителей взаимодействия. Он подтвердил это в ряде лабораторных [1] и астрофизических [2, 3] экспериментов. Наш анализ показал, что свойства козыревских корреляций феноменологически похожи на квантовые нелокальные корреляции, в контексте транзакционной интерпретации квантовой нелокальности [8], ее сохранения в макропределе [9] и генерации запутанности за счет диссипации [26 – 28]. Это позволяет ввести уравнение макроскопической нелокальности, описывающее формально фактические результаты Козырева [10, 11, 13, 14]:

$$\dot{S} = \sigma \int \frac{\dot{s}}{x^2} \delta(t^2 - \frac{x^2}{v^2}) dV, \quad (5)$$

где

$$\sigma \sim \frac{\hbar^4}{m_e^2 e^4}, \quad (6)$$

$v^2 \leq c^2$, \dot{S}_d – производство энтропии в пробном процессе (детекторе), σ – сечение взаимодействия, \dot{s} – плотность производства энтропии в источниках. (Безразмерная термодинамическая энтропия S и шенноновская энтропия H в уравнении (1) отличаются пространствами определения вероятностей и легко могут быть связаны между собой в рамках теории расслоенных пространств [24]). δ -функция показывает, что транзакция идет с симметричным запаздыванием и опережением. В частности, если транзакция происходит посред-

ством диффузионного обмена запутанностью, значения запаздывания и опережения достаточно велики.

Уравнение (5) в своей простейшей форме не берет в расчет поглощение средой. Однако, его влияние весьма своеобразно. В работах Хойла и Нарликара [29] доказано, что, несмотря на то, что уравнения электродинамики Уиллера-Фейнмана (откуда берет начало транзакционная интерпретация) симметричны во времени, фундаментальная асимметрия времени проявляется себя через асимметричное поглощение: в то время как запаздывающее поле поглощается полностью, поглощение опережающего поля должно быть неполным. Это приводит к тому, что уровень опережающей корреляции через экранирующую среду может превышать уровень запаздывающей.

Так как невозможно наблюдать S и s непосредственно, мы должны найти для конкретного источника и пробного процесса теоретическое выражение, связывающее энтропии с наблюдаемыми величинами: $\dot{S} = F(P_d, \{p_d\})$, $\dot{s} = f(P_s, \{p_s\})$, где P_s – измеряемый параметр процесса-источника, P_d – измеряемый параметр пробного процесса (сигнал детектора), $\{p\}$ – набор других параметров процессов, влияющих на энтропию, которые должны быть известны, если только они не являются постоянными. Эта задача вполне решаема [10 – 13, 17].

Если мы наблюдаем описанные странные корреляции (X и Y), то как доказать их нелокальную природу? Предположим, что некий процесс X воздействует на удаленный процесс Z посредством какого-то локального взаимодействия по причинной цепи $X \rightarrow Y \rightarrow Z$. Опосредующий процесс Y расположен так, что локальный носитель взаимодействия не может попасть в Z помимо Y (например, Y занимает сферический слой вокруг Z). Тогда требование локальности в терминах условных энтропий будет выглядеть следующим образом:

$$H(Z|XY) = H(Z|Y). \quad (7)$$

Преобразуем левую часть этого уравнения:

$$H(Z|XY) = H(XYZ) - H(XY) = H(XZ) + H(Y|XZ) - H(X) - H(Y|X) = H(Z|X) + H(Y|XZ) - H(Y|X).$$

Подставляя последнее выражение в (7), получаем:

$$H(Z|X) - H(Z|Y) = H(Y|X) - H(Y|XZ). \quad (8)$$

Поскольку $H(Y|X) - H(Y|XZ) \geq 0$, $H(Z|X) \geq H(Z|Y)$. Нормируем на $H(Z)$:

$$i_{Z|X} = H(Z|X)/H(Z) \geq H(Z|Y)/H(Z) = i_{Z|Y}. \quad (9)$$

Далее, перегруппируем члены в (8):

$$H(Z|X) - H(Y|X) = H(Z|Y) - H(Y|XZ). \quad (8a)$$

Преобразуем правую часть этого уравнения:

$$H(Z|Y) - H(Y|XZ) = H(YZ) - H(Y) - H(XYZ) + H(XZ) = H(YZ) + H(XZ) - H(XZ|Y).$$

Так как $H(YZ) \geq 0$ и $H(XZ) - H(XZ|Y) \geq 0$, в левой части уравнения (8а) $H(Z|X) \geq H(Y|X)$. Согласно 7-й теореме Шеннона [30], $H(Z) \leq H(Y)$, откуда

$$i_{Z|X} = H(Z|X)/H(Z) \geq H(Z|X)/H(Y) = i_{Y|X}. \quad (10)$$

Уравнения (9) и (10) сводятся к неравенствам типа Белла, нарушение которых означает, что корреляции X и Z нелокальны:

$$i_{Z|X} \geq \max(i_{Z|Y}, i_{Y|X}). \quad (11)$$

В этом выводе классическое свойство неотрицательности условной энтропии нигде не было использовано. Принимая в расчет параллелизм классической и квантовой теории информации [31], это означает, что настоящий вывод сохраняется также и в терминах фон-неймановских энтропий. Была использована только идея нелокальности, но не скрытых переменных. Известно, что нарушение всех неравенств типа Белла в квантовой механике свидетельствует об отсутствии скрытых локальных переменных. Таким образом, надо подчеркнуть, что нарушение неравенств (11) не исключает наличия скрытых нелокальных переменных. Примером типичной скрытой нелокальной переменной является опережающее поле Уиллера-Фейнмана и его обобщение на квантовые амплитуды [8, 25, 29, 32].

3. Эксперимент

Задача нашего эксперимента – установить корреляцию изменений энтропии в пробном процессе и в процессе-источнике в соответствии с уравнением (5) при условии подавления всех классических воздействий (температуры, электромагнитного поля и т.п.).

Были созданы две экспериментальные установки для изучения эффекта макроскопической нелокальности (в ЦГЭМИ и МГТУ). В установке ЦГЭМИ использовались детекторы нелокальных корреляций, основанные на процессах спонтанных вариаций собственных потенциалов слабополяризующихся электродов в электролите и темного тока фотоумножителя. В установке МГТУ применены детекторы, основанные на флуктуациях подвижности ионов в электролите. Теория детекторов позволяет связать измеряемый сигнал с производством энтропии в пробном процессе, т.е. вычислить левую часть уравнения (5), и целенаправленно предпринять меры для подавления локальных воздействий. Устройство детекторов и их параметры описаны подробно в работах [10-13].

В качестве процессов-источников были использованы крупномасштабные гелиогеофизические процессы с большой случайной составляющей и детерминированные лабораторные процессы (фазовые переходы). Поскольку в последних наблюдалась только запаздывающая корреляция [34, 35], далее рассматриваются только первые. Все представ-

ленные ниже результаты базируются на длительных непрерывных рядах измерений продолжительностью от года до трех лет, с дискретностью данных от 5 мин. до 1 ч.

Сигналы всех детекторов, в том числе и удаленных на 40 км, оказались синхронно коррелированными. Анализ показал, что они формируются под действием некоторых общих причин, влияние которых, однако, не могло быть локальным.

Таковыми общими причинами оказались (в порядке убывания интенсивности влияния): солнечная, синоптическая, геомагнитная и ионосферная активность. Опережающая реакция сигнала детекторов на эти процессы была достоверно установлена. Запаздывающая реакция всегда меньше. Диапазон времени опережения (и запаздывания) велик – от 10 часов до 130 дней. Величина реакции датчика и время опережения увеличиваются с ростом пространственного масштаба процесса-источника.

Наши усилия в основном были сконцентрированы на солнечной и геомагнитной активности, поскольку первая является признанной причиной последней, процессы солнечной активности самые мощные в Солнечной системе, а процессы геомагнитной активности позволяют достаточно просто вычислить правую часть уравнения (5). Оба эти типа процессов имеют большую случайную составляющую, а детерминированная компонента имеет общеизвестные периоды и, следовательно, её легко подавить с помощью фильтрации. Было установлено, что сигналы детектора сильнее всего коррелируют с потоками солнечного радиоизлучения R в частотном диапазоне 610-2800 МГц (что соответствует источникам на уровне низов короны – верхов хромосферы, т.е. на уровне наибольшей диссипации в солнечной атмосфере) [12]. Оптимальная частота (с наибольшей корреляцией), внутри этого диапазона год от года меняется. Что касается геомагнитной активности, то было установлено, что сигналы детекторов наиболее коррелируют не с местными вариациями геомагнитного поля, а с Dst -индексом глобальной геомагнитной активности. Важно отметить, что детекторы сами по себе нечувствительны к локальному воздействию геомагнитного поля и солнечного радиоизлучения, индексы Dst и R в наших экспериментах характеризуют производство энтропии в магнитосфере Земли и солнечной атмосфере, соответственно.

На рис. 1 показан результат причинного анализа солнечной активности R и сигнала электродного детектора U за год, соответствующий началу 23 солнечного цикла. В области опережения ($\tau > 0$) значения функции независимости (U от R) много ниже, чем в области запаздывания ($\tau < 0$), а функция причинности много больше 1. Самый глубокий минимум $i_{XY} \approx 0.47$ и самый высокий максимум $\gamma \approx 1.6$ наблюдаются при $\tau = 42$ сут. Максимум функции корреляции вблизи этого τ равен 0.76 ± 0.08 [12, 13].

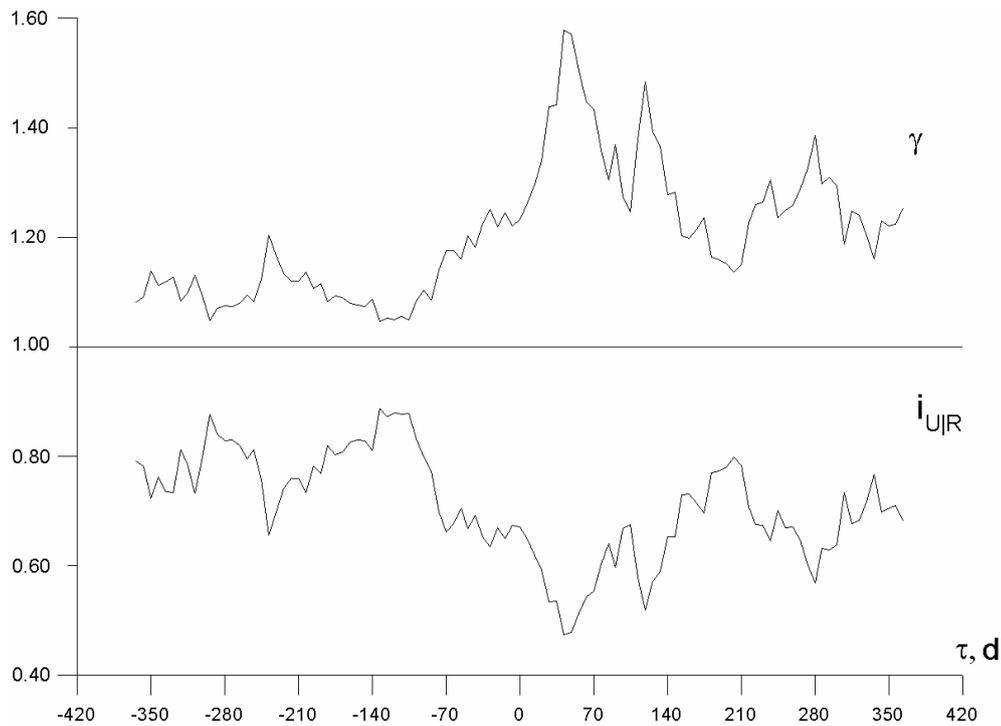


Рис. 1. Функции независимости $i_{U|R}$ и причинности $\gamma = i_{R|U} / i_{U|R}$ сигнала детектора U и солнечного радиоизлучения R на частоте 2800 MHz . Отрицательный временной сдвиг τ (в сутках) соответствует запаздыванию U относительно R . Ряд U 11.12.1996 – 10.12.1997 (ряд R начинается годом раньше и кончается годом позже U).

Положение главного максимума корреляции (функции причинности) и главного минимума функции независимости оказалось довольно нестабильным. Хотя значение $\tau = 42 \text{ сут.}$ встречается весьма часто, оно может варьировать для разных реализаций от 33 до 130 сут. Следует отметить, что детерминированные (периодические) компоненты процессов-источников являются причиной только запаздывающего отклика детектора. Поэтому, для увеличения соотношения сигнал/шум в области опережения из исходных рядов посредством предварительной фильтрации вычитались главные периодические составляющие, соответствующие суточным, месячным (период вращения Солнца) и годичным вариациям. В примере, показанном на рис. 1, достаточно было низкочастотной фильтрации с граничным периодом $T > 7 \text{ сут.}$ Чаще всего приходилось использовать полосовую фильтрацию с диапазоном $28 < T < 365 \text{ сут.}$ или $28 < T < 183 \text{ сут.}$ Предварительная полосовая фильтрация чрезвычайно важна для обнаружения опережающих корреляций с геомагнитной активностью [17]. Максимальная опережающая корреляция, наблюдаемая при оптимальной фильтрации, составила 0.92 ± 0.03 для солнечной активности [18] и -0.952 ± 0.04 для геомагнитной [17].

Производство энтропии в магнитосфере (благодаря омической диссипации) трудно рассчитать по наблюдаемому Dst -индексу. Это позволило проверить уравнение (5) посредством сопоставления амплитудного спектра Dst и сигнала детектора [17]. В частно-

сти, было вычислено значение сечения σ . Для всех трех типов детектора σ оказалось порядка 10^{-20} м^2 , в согласии с теоретической оценкой (6).

Нелокальная природа опережающей корреляции была установлена из нарушения неравенства (11). В одном случае в качестве процесса X брались случайные вариации внешней (лабораторной) температуры, Y – вариации внутренней температуры детектора, Z – сигнал детектора [10, 12, 13]. Во втором случае X – солнечная активность, Y – геомагнитная, Z – сигнал детектора [15, 18]. Например, во втором случае: $X = R$ (на частоте 1415 МГц), $Y = Dst$, $Z = U$, установлены значения функций независимости $i_{Z|X} = 0.46_{-0.02}^{+0.01}$, $i_{Z|Y} = 0.51_{-0.02}^{+0.00}$, $i_{Y|X} = 0.83_{-0.02}^{+0.00}$. Неравенство (11) очевидно нарушено, поэтому корреляция солнечной активности и сигнала детектора нелокальна. Наблюдались также некоторые нестатистические свидетельства нелокальной связи этих сигналов (отдельные отклики детектора на мощную солнечную вспышку, не влияющую на геоактивность) [15].

Ранее была продемонстрирована возможность долгосрочного прогноза случайной компоненты солнечной, геомагнитной и синоптической активности. Это было сделано простейшим способом – сдвигом по времени временных рядов на величину τ , соответствующую главному максимуму корреляции при оптимальной фильтрации [11-18].

Но для реального прогноза такой простой способ непригоден, во-первых, потому, что процессы далеки от δ -коррелированных, и поэтому неизбежна большая ошибка, и, во-вторых, положение главного максимума корреляции непостоянно из-за нестационарности процессов.

4. Прагматический алгоритм прогноза

Для решения задачи реального прогноза разработан метод, основанный на свертке импульсной переходной характеристики с множеством предыдущих значений сигнала детектора. На «обучающем» интервале $[t_1, t_2]$ вычисляется импульсная переходная характеристика $g(\tau)$, которая связывает сигнал детектора X и прогнозируемый параметр Y , из решения следующего уравнения:

$$Y(t) = \int_{t_1}^{t_2} g(\tau) X(t - \tau) d\tau. \quad (12)$$

Уравнение (12) в дискретном виде сводится к системе линейных уравнений $\{Y=XX\}$. Компоненты вектора K эквивалентны коэффициентам множественной регрессии (в случае гауссова распределения). Число уравнений n равно заблаговременности 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.

Найденная таким путем переходная характеристика далее используется для вычисления только одного значения прогнозируемого параметра с фиксированным опережением (которое равно ожидаемому среднему положению опережающего максимума корреляционной функции). Для этого решается прямая задача (12) для временного интервала, сдвинутого на одни сутки. Затем обучающий интервал также сдвигается на один шаг (сутки), и прогнозируется следующее значение. Такая процедура позволяет минимизировать влияние нестационарности. Подавление остаточной неустойчивости достигается оптимальной постфильтрацией.

Этот метод эквивалентен множественной регрессии, но в нём не требуется дополнительных предположений о вероятностном распределении. Это существенно, так как распределение естественных данных далеко не всегда является гауссовым.

Замечательно, что (12) универсально и пригодно для решения как поставленной задачи, так и для ординарного детерминистического прогноза. Поэтому алгоритм назван прагматическим. Но физически имеется принципиальная разница в направленности причинной связи: в нашей модели $Y \rightarrow X$, тогда как обычно $X \rightarrow Y$. Именно обратное время делает возможным прогноз случайных процессов.

5. Результаты прогнозирования

Хотя описанный выше алгоритм был испытан на заранее накопленных экспериментальных данных, мы смоделировали именно прогноз в реальном времени. Мы использовали все полученные непрерывные временные сигналы детектора достаточной длины – не менее года для R и двух лет для Dst (так как меньшая длина рядов делает невозможной предварительную фильтрацию, в особенности необходимую для Dst). Такому требованию удовлетворяли только данные электродного детектора U .

Фактическая эволюция R и Dst сравнивалась с результатом прогнозирования. Качество прогноза оценивалось расчетом стандартного отклонения прогностической кривой от фактической (абсолютная ошибка ε , приводимая ниже, дана в единицах, соответственно, $10^{-22} \text{ Вт м}^{-2} \text{ Гц}^{-1}$ для R и $n\text{Тл}$ для Dst).

На рис. 2 показан прогноз солнечной активности на тех же данных (и с той же предфильтрацией $T > 7 \text{ сут.}$), что на рис. 1. Прогнозирующая кривая подвергнута постфильтрации с периодом $T > 7 \text{ сут.}$ Полученная заблаговременность $\tau = 39 \text{ сут.}$, ошибка ε

= 5.2. Без постфильтрации: $\tau = 42$ сут., $\varepsilon = 5.4$. Снижение ошибки за счет постфильтрации невелико.

На рис. 3 показан прогноз солнечной активности по самым большим из имеющихся в наличии временным рядам. Предфильтрация в этом случае $T > 28$ сут., постфильтрация – $T > 14$ сут. Полученная заблаговременность $\tau = 35$ сут., $\varepsilon = 0.88$, в то время как без постфильтрации $\tau = 42$ сут., $\varepsilon = 1.16$. В этом случае польза постфильтрации очевидна.

На рис. 4 показан геомагнитный прогноз на тех же данных и с той же постфильтрацией, что на рис. 3 (но с другой предфильтрацией $28 < T < 364$ сут.). Полученная заблаговременность $\tau = 35$ сут., $\varepsilon = 1.7$, без постфильтрации $\tau = 42$ сут., $\varepsilon = 2.4$.

На рис. 5 показан прогноз солнечной активности на данных последнего эксперимента, допускающих прогноз с наибольшей заблаговременностью. Предфильтрация $28 < T < 183$ сут., постфильтрация – $T > 14$ сут. Результат: $\tau = 123$ сут., $\varepsilon = 2.0$, без постфильтрации $\tau = 130$ сут., $\varepsilon = 2.4$.

На рис. 6 показан геомагнитный прогноз на тех же данных, с той же предфильтрацией и постфильтрацией, что на рис. 5. Результат: $\tau = 123$ сут., $\varepsilon = 2.9$, без постфильтрации $\tau = 130$ сут., $\varepsilon = 3.5$.

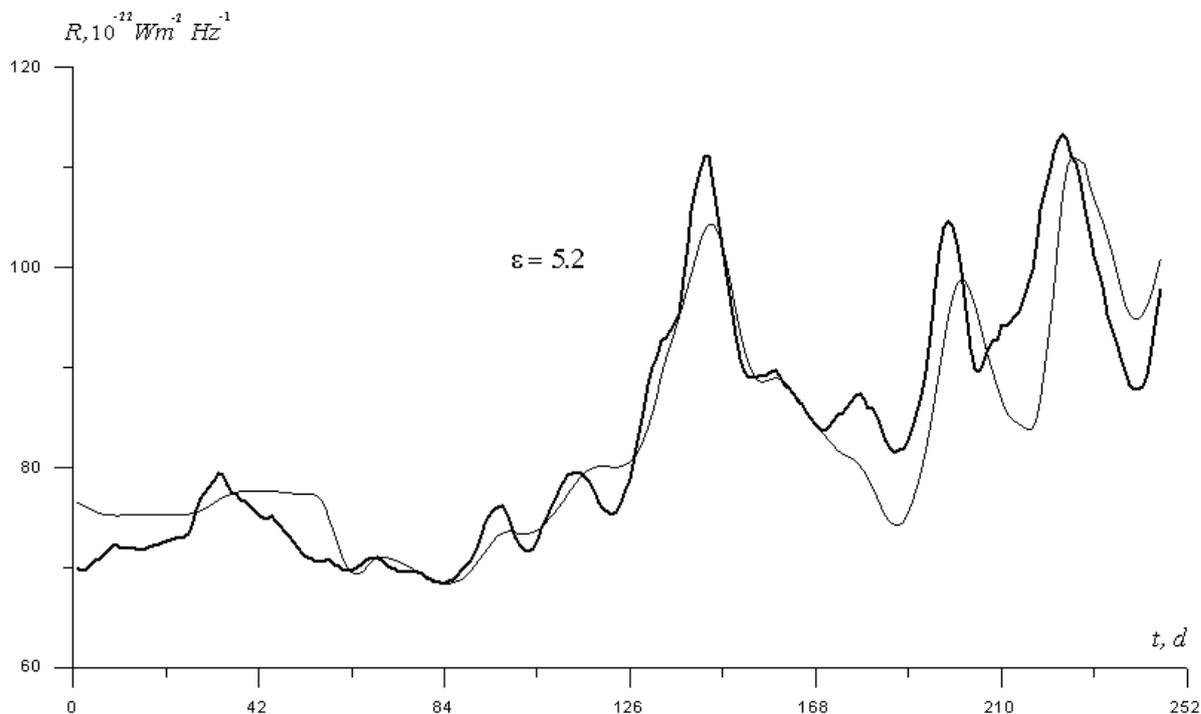


Рис. 2. Прогноз солнечной активности R (на частоте 2800 МГц) с заблаговременностью 39 суток (тонкая линия) в сравнении с фактической кривой (жирная линия). Начало отсчета соответствует 21.03.1997.

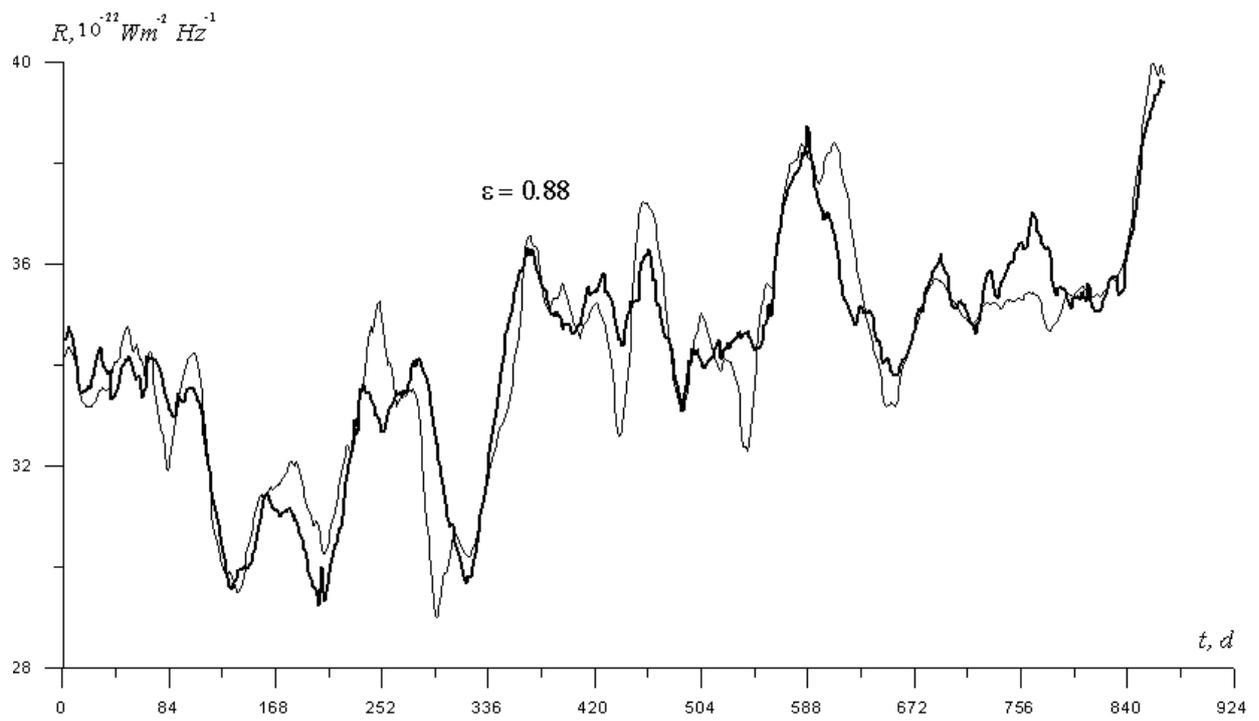


Рис. 3. Прогноз солнечной активности R (на частоте 610 МГц) с заблаговременностью 35 суток (тонкая линия) в сравнении с фактической кривой (жирная линия). Начало отсчета соответствует 20.03.1995.

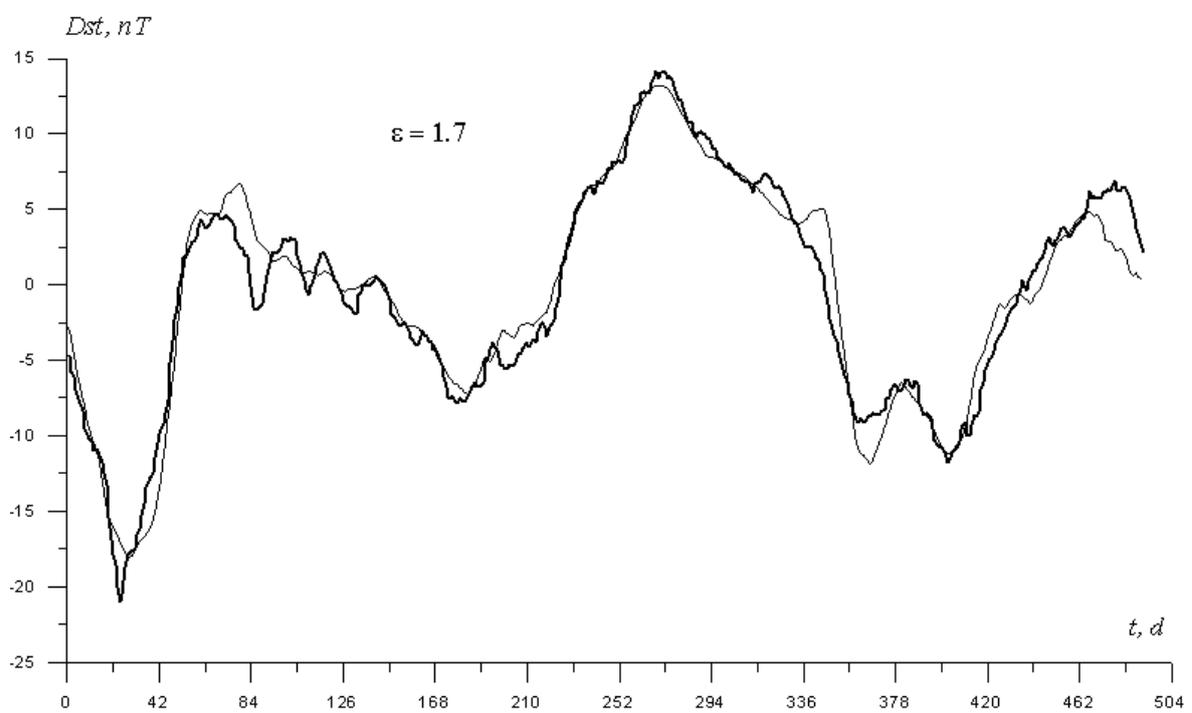


Рис. 4. Прогноз геомагнитной активности Dst с заблаговременностью 35 суток (тонкая линия) в сравнении с фактической кривой (жирная линия). Начало отсчета соответствует 19.09.1995.

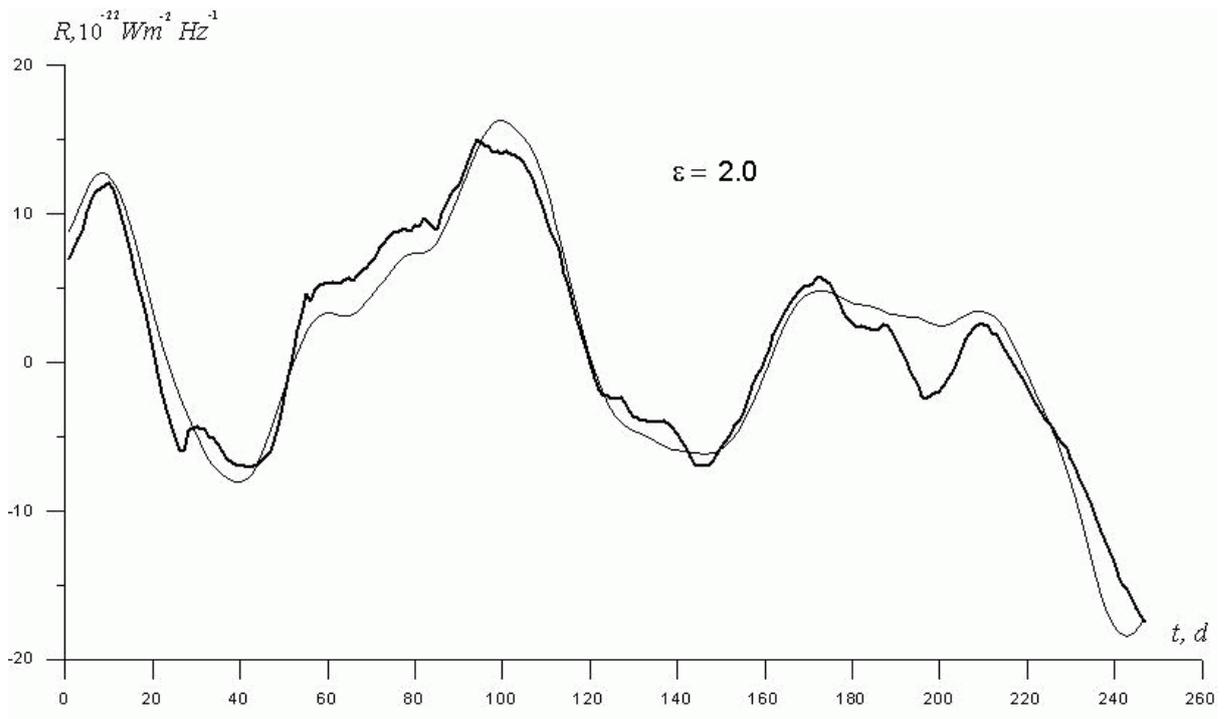


Рис. 5. Прогноз солнечной активности R (на частоте 1415 МГц) с заблаговременностью 123 суток (тонкая линия) в сравнении с фактической кривой (жирная линия). Начало отсчета соответствует 20.02.2003.

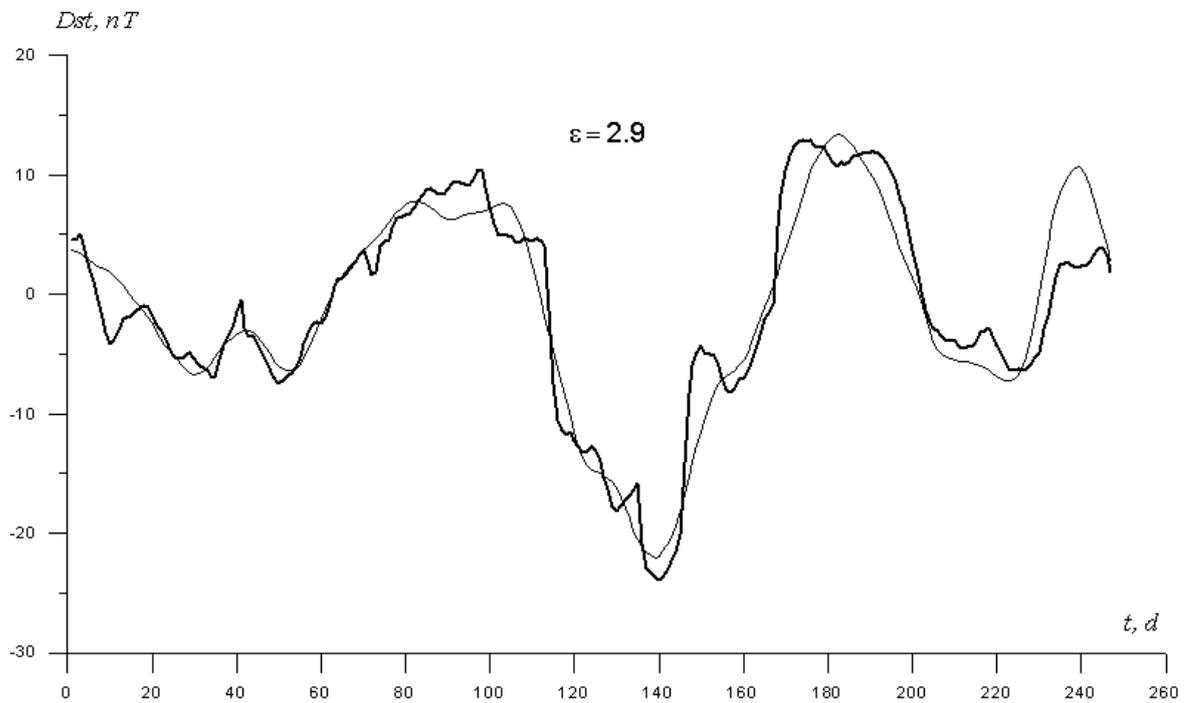


Рис. 6. Прогноз геомагнитной активности Dst с заблаговременностью 123 суток (тонкая линия) в сравнении с фактической кривой (жирная линия). Начало отсчета соответствует 20.02.2003.

Как видно из рис. 2-6, качество полученных прогнозов весьма удовлетворительное, ошибка ε мала по сравнению с соответствующими типичными значениями прогнозируемых индексов R или Dst .

6. Заключение

На современном уровне строгости проведенные эксперименты согласуются с удивительными выводами Н.А. Козырева о проявлении обратимости в необратимом времени, о возможности наблюдения будущих случайных состояний. Конечно, уравнение макроскопической нелокальности (5) до сих пор остается эвристической гипотезой и требуется дальнейшее накопление экспериментальных фактов и развитие последовательной теории эффекта макроскопической нелокальности.

Как показало наше исследование на примерах солнечной и геомагнитной активности, независимо от наличия или отсутствия теоретического обоснования, уже сейчас возможно использовать эффект макроскопической нелокальности для долгосрочного прогноза крупномасштабных естественных процессов. Следует подчеркнуть, что представленный здесь метод уникален, так как прогнозирует случайную компоненту процесса. Все другие существующие подходы к проблеме прогнозирования по сути своей являются детерминистическими (несмотря на применение статистических кросс- и авто-регрессионных алгоритмов), чем больше случайная компонента в исходных рядах, тем больше ошибка прогноза. Описанный в данной работе метод прогноза способен существенно дополнить другие методы, широко используемые на сегодня.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Козырев Н.А.* Избранные труды. Л.: 1991.-447с.
2. *Козырев Н.А., Насонов В.В.* Новый метод определения тригонометрических параллаксов на основе измерения разности между видимым и истинным положением звезд // Проблемы исследования Вселенной. 1978. Вып. 7. С.168-179.
3. *Козырев Н.А., Насонов В.В.* О некоторых свойствах времени, обнаруженных астрономическими наблюдениями // Проблемы исследования Вселенной. 1980. Вып. 9. С. 76-84.
4. *Козырев Н.А.* Астрономическое доказательство реальности четырехмерной геометрии Минковского // Проблемы исследования Вселенной. 1980. Вып. 9. С. 85-93.
5. *Savage D.* Measuring local time dilation using sandglass egg timers // Progress in Space-Time Physics. Blumberg: Wessely Press. 1987. P.242–251.

6. *Лаврентьев М.М., Еганова И.А., Медведев В.Г., Олейник В.К., Фоминых С.Ф.* О сканировании звездного неба датчиком Козырева // ДАН. 1992. Т.323. №4. С.649-652.
7. *Hayasaka H., Takeuchi S.* Anomalous weight reduction on a gyroscope right rotation around the vertical axis on the Earth // Phys. Rev. Lett. 1989. V.63. №25. P.2701–2704.
8. *Cramer J.G.* The transactional interpretation of Quantum Mechanics // Rev.Mod. Phys. 1986. V. 58. P. 647-688.
9. *Home D., Majumdar A.S.* Incompatibility between quantum mechanics and classical realism in the strong macroscopic limit // Phys. Rev. A. 1995. V.52. N 6. P. 4959-4962.
10. *Korotaev S.M., Serdyuk V.O., Sorokin M.O., Abramov J.M.* Geophysical manifestation of interaction of the processes through the active properties of time // Physics and Chemistry of the Earth. A. 1999. V. 24. N 8. P. 735-740.
11. *Коротаев С.М., Сердюк В.О., Сорокин М.О.* Проявление макроскопической нелокальности в геомагнитных и солнечно-ионосферных процессах // Геомагнетизм и аэронавигация. 2000. Т. 40. №3. С. 56-64.
12. *Коротаев С.М., Морозов А.Н., Сердюк В.О., Сорокин М.О.* Проявление макроскопической нелокальности в некоторых естественных диссипативных процессах // Известия высших учебных заведений Физика. 2002. №5. С. 3-14.
13. *Korotaev S.M., Morozov A.N., Serdyuk V.O., Gorohov J.V.* Experimental evidence of nonlocal transaction in reverse time // Physical Interpretation of Relativity Theory. Moscow: BMSTU Press, 2003. P. 200-212.
14. *Korotaev S.M., Serdyuk V.O., Nalivayko V.I., Novysh A.V., Gaidash S.P., Gorohov J.V., Pulinets S.A., Kanonidi Kh. D.* Experimental estimation of macroscopic nonlocality effect in solar and geomagnetic activity // Physics of Wave Phenomena. 2003. V.11. N.1. P.46-54.
15. *Korotaev S.M., Serdyuk V.O., Gorohov J.V., Pulinets S.A., Machinin V.A.* Forecasting affect of macroscopic nonlocality // Frontier Perspectives. 2004. V.13. N 1. P. 41-45.
16. *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.* Manifestation of macroscopic nonlocality in the processes of solar and geomagnetic activity // Vestnik of BMSTU. 2004. Special Issue. P. 173-185.
17. *Korotaev S.M., Morozov A.N., Serdyuk V.O., Gorohov J.V., Machinin V.A.* Experimental study of macroscopic nonlocality of large-scale geomagnetic dissipative processes // NeuroQuantology. 2005. V.3. №4. P. 250-269.
18. *S.M. Korotaev, A.N. Morozov, V.O. Serdyuk, Gorohov J.V., Machinin V.A.* Experimental study of advanced nonlocal correlation of of large-scale dissipative processes. // Physical Interpretations of Relativity Theory. Moscow: BMSTU, 2005, P. 209-215.

19. *Korotaev S.M.* Formal definition of causality and Kozyrev's axioms // Galilean Electrodynamics. 1993. V.4. №5. P.86–89.
20. *Коротаев С.М.* О возможности причинного анализа геофизических процессов // Геомагнетизм и аэрономия. 1992. Т.32. №5. С.27–33.
21. *Хачай О.А., Коротаев С.М., Троянов А.К.* Результаты применения причинного анализа для обработки скважинных данных сейсмоакустической и электромагнитной эмиссии // Вулканонология и сейсмология. 1992. № 3. С.92–100.
22. *Коротаев С.М., Шабелянский С.В., Сердюк В.О.* Обобщенный причинный анализ и его применение для изучения электромагнитного поля в море // Изв. АН. Физика Земли. 1992. №6. С.77–86.
23. *Коротаев С.М., Хачай О.А., Шабелянский С.В.* Причинный анализ процесса горизонтальной информационной диффузии электромагнитного поля в океане // Геомагнетизм и аэрономия. 1993. Т.33. №2. С.128–133.
24. *Коротаев С.М.* Роль различных определений энтропии в причинном анализе геофизических процессов и их приложение к электромагнитной индукции в морских течениях // Геомагнетизм и аэрономия. 1995. Т.35. №3. С.116–125.
25. *Cramer J.G.* Generalized absorber theory and the Einstein-Podolsky-Rosen paradox // Phys. Rev. D. 1980. V.22. N 2. P. 362-376.
26. *Jakobczyk L.* Entangling two qubits by dissipation // J. Phys. A. 2002. V. 35. P. 6383–6391.
27. *Башиаров А.М.* Декогеренция и перепутывание при радиационном распаде двухатомной системы // ЖЭТФ. 2002. Т.121. Вып.6. С. 1249-1260.
28. *Benatti F., Floreanini R., Piani M.* Environment induced entanglement in Markovian dissipative dynamics. // Phys. Rev. Lett., 2003. V. 91, P. 070402-4.
29. *Hoyle F., Narlikar J.V.* Cosmology and action-at-a-distance electrodynamics // Rev. Mod. Phys. 1995. V. 67. N 1. P. 113-156.
30. *Шеннон К.Э.* Работы по теории информации и кибернетике.-М.: ИЛ,1963.- 829с.
31. *Cerf N.J.* Entropic bounds on coding for noisy quantum channels // Phys. Rev. A. 1998. V. 57. N5. P.3330-3347.
32. *Владимиров Ю.С., Турыгин А.Ю.* Теория прямого межчастичного взаимодействия. М.: Энергоатомиздат, 1986.-208с.
33. *Морозов А.Н.* Необратимые процессы и броуновское движение.М.: МГТУ, 1997.-332с.
34. *Коротаев С.М., Сердюк В.О., Сорокин М.О., Мачинин В.А.* Экспериментальное исследование нелокальности контролируемых диссипативных процессов // Физическая мысль России. 2000. N 3. С. 20-26.