

С. М. Коротаев, А. Н. Морозов, В. О. Сердюк

СЛУЧАЙНОЕ БУДУЩЕЕ КАК СУЩЕСТВУЮЩАЯ РЕАЛЬНОСТЬ¹

Развитие квантовой механики представило в новом свете идеи Н. А. Козырева и результаты его экспериментов. Возможность наблюдения будущих состояний как существующей реальности, продемонстрированная на последних этапах его исследований, ныне представляется реальной. Квантовомеханический принцип слабой причинности допускает наличие сигналов в обратном времени для случайных процессов. В серии экспериментов выявлен опережающий отклик лабораторных детекторов на крупномасштабные гелиогеофизические процессы. Высокий уровень опережающей корреляции и большой временной сдвиг позволили делать долгосрочные прогнозы солнечной и геомагнитной активности.

Korotaev S. M., Morozov A. N., Serdyuk V. O. The accidental future as an existing reality. The progress in quantum mechanics has shed a new light on N. A. Kozyrev's ideas and his experimental results. The possibility of observation of the future states as the existing reality demonstrated by scientist seems now real. The quantum mechanical principle of weak causality admits availability of the signals in reverse time for the random processes. The series of experiments has revealed availability of the advanced response in the lab detectors to large-scale dissipative heliogeophysical processes. The high level of advanced correlation and the large time shift allowed to do the long-term forecasts of solar and geomagnetic activity.

1. ВВЕДЕНИЕ

Почти все работы Николая Александровича Козырева, будь то звездная или планетная астрофизика или фундаментальная физика, встречали вначале недоверчивую реакцию коллег, за которой спустя много лет наступало спокойное признание. Особенно драматична судьба причинной механики — нового физического направления, затрагивающего самые принципиальные основы, — понимание природы времени, приводящей к конкретным следствиям, доступным экспериментальной проверке. Несмотря на

¹ © С. М. Коротаев, А. Н. Морозов, В. О. Сердюк, 2008.

естественность аксиоматики, ясную логику и, главное, точное описание экспериментов, причинная механика была исходно отвергнута отечественным истеблишментом (а зарубежным не замечена). Научного спора не было — не было ни единой публикации с анализом аргументов Н. А. Козырева и сколько-нибудь жесткой, но содержательной критики. Никто при жизни Н. А. Козырева не взял на себя труд воспроизвести его эксперименты. Положение стало меняться, как водится, после смерти автора идеи. Но широкое обсуждение было так необходимо именно при жизни ученого, чтобы увидеть связь его идей с другими — теорией прямого межчастичного взаимодействия, квантовой нелокальностью и некоторыми другими. Тогда был бы возможен быстрый и плодотворный их синтез. Этого, тем не менее, не произошло, поэтому наследие Козырева — не укатанная дорога, которую надо продолжать, а скорее, тропинка в неизведанном пространстве, которую мы пытаемся расширить и укрепить.

Настоящая работа рассматривает современное состояние вопроса, связанного с последним открытием Н. А. Козырева, которое сам он считал чрезвычайно важным и к которому шел с большим упорством (и дошел!) в последние годы жизни. Именно это открытие вызвало особое неудовольствие научного начальства — появился приказ об уничтожении всего тиража сборника со статьей Н. А. Козырева и В. В. Насонова (история спасения сборника — отдельная драматическая история). Даже в 1991 г. составители избранных трудов Н. А. Козырева [8] не решились включить в них статьи [7, 9, 10] на эту тему, опасаясь за судьбу всей книги. Речь идет о возможности наблюдения будущих состояний как существующей реальности. Н. А. Козырев подтвердил это наблюдениями будущих положений звезд и других удаленных объектов. Но принцип предоставляет более широкие возможности, в то же время удивительным образом отграничивая такую возможность от проявления общеизвестных парадоксов.

Мы используем результаты Н. А. Козырева не как стартовый пункт, а напротив, как путеводную звезду, позволяющую выделить имеющие отношение к проблеме идеи теоретической физики и выполнить эксперименты на современном уровне строгости в иной постановке.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД

Теория относительности не допускает связи через пространственноподобный интервал. Именно поэтому с момента открытия (30-е годы XX в.) явление квантовой нелокальности привлекает внимание кажущимся нарушением принципов относительности. В действительности квантовые корреляции осуществляются через пространственноподобный интервал. Это не противоречит теории относительности именно благодаря отсутствию каких-либо локальных носителей взаимодействия, но продолжает оставаться странным, потому что такие корреляции делают возможным обращение временного порядка событий. Стремительное развитие квантовой теории информации обходит стороной этот вопрос, потому что с самого начала было понятно — квантовый нелокальный канал может передавать только неизвестную информацию, следовательно, для коммуникации обязательно требуется вспомогательный классический канал. Поэтому вопрос становится несущественным.

В 1980 г. Дж. Крамер предложил элегантную транзакционную интерпретацию квантовой нелокальности, опирающуюся на теорию прямого межчастичного взаимодействия Уиллера–Фейнмана и ее обобщение на квантовые амплитуды [31]. Он осторожно указывал, что это только интерпретация, позволяющая объяснить все основные квантовые явления, но не предсказывать какие-либо новые [32]. Однако его идея оказалась намного богаче. Дж. Крамер был первым, кто явно различил принципы сильной (локальной) и слабой (нелокальной) причинности. Последняя влечет за собой возможность опережающих корреляций, но только связанных с неизвестными состояниями, или, в другой терминологии, с истинно случайными процессами. Слабая причинность позволяет получать некоторую информацию из будущего без хорошо известных классических парадоксов, поскольку эта информация касается только случайной составляющей, не обусловленный предшествующей эволюцией (наблюдатель может узнать заранее только то, на что нельзя повлиять). Это позволило А. Элитзуру и С. Долеву предложить экспериментальное детектирование обращенных во времени причинных событий, а именно, запутанности квантовых состояний частиц до их взаимодействия [34]. Другой путь учета обращенных

по времени корреляций был предложен и экспериментально проверен применительно к квантовой телепортации М. Лафарестом и др. [53]. В этом случае наблюдатель узнает о факте обращенного во времени взаимодействия постфактум.

Хотя работы Дж. Крамера содержали некоторое внутреннее противоречие — объяснение квантовых явлений на основе классической теории Уиллера–Фейнмана, на современном этапе квантовая теория прямого межчастичного взаимодействия является последовательно развитой теорией [4, 38]. Вместе с тем еще недавно принято было считать, что квантовая нелокальность проявляется только на микроуровне, поэтому Дж. Крамер относил слабую причинность только к этому уровню. Однако с середины 90-х годов стала распространяться и затем успешно реализовываться экспериментально [35, 40, 55] идея о сохранении эффекта нелокальности в макропределе [30, 33, 36, 37, 54]. Стали обнаруживаться важные экспериментальные результаты, полученные до возникновения этой идеи и ныне объясняемые как проявление макроскопической запутанности [29]. Анализ аксиоматики и экспериментальных результатов причинной механики Н. А. Козырева [19, 22, 23, 42, 44, 52] показал, что, несмотря на разную интерпретацию, причинная механика идейно и фактически представляет собой сферу, в которой проявляется макроскопическая нелокальность, причем именно в духе теории прямого межчастичного взаимодействия. Наибольшее отличие козыревских эффектов заключается, пожалуй, в том, что они проявляются в существенно диссипативных процессах, в то время как известно, что диссипация ведет к декогеренции. Однако сравнительно недавно разными исследователями и с разных исходных позиций [3, 28, 39] была выявлена противоположная конструктивная роль диссипации в генерации запутанных состояний.

Развитие квантовой механики, позволившее по-новому взглянуть на работы Н. А. Козырева, подтолкнуло нас к постановке собственных экспериментов на современном уровне строгости [5, 13–23, 26, 43, 45–52]. Под таким уровнем мы понимаем не только исчерпывающие меры по подавлению помех, но и достаточную четкость формулировки проверяемой гипотезы. Важным предварительным этапом была формализация аксиоматики причинной

механики [2, 41]. При этом был сформирован аппарат причинного анализа данных физического эксперимента, получивший широкое применение при решении вполне классических задач (например, [1, 11, 12, 24, 25, 27]).

2.1. Модель макроскопической нелокальной транзакции

Несмотря на достигнутые успехи [30, 33, 36, 37, 54], развитие последовательной теории макроскопической запутанности (которая должна напоминать классическую термодинамику, т. е. оперировать макроскопическими параметрами) представляет собой трудную задачу, и такой теории пока не существует. Но на основе описанных ранее идей удалось сформировать эвристическое уравнение макроскопической нелокальности, связывающее производство энтропии на частицу в пробном процессе (детекторе) \dot{S}_d с плотностью полного производства ее в источниках \dot{s} [19, 22, 23, 29, 44, 50–52]:

$$\dot{S}_d = \sigma \int_V \frac{\dot{s}}{x^2} \delta\left(t^2 - \frac{x^2}{v^2}\right) dV$$

где сечение $\sigma \sim \hbar^4 / (m_e^2 e^4)$; m_e — масса электрона; e — элементарный заряд; x — расстояние; t — время; скорость распространения v при диффузном обмене запутанностью может быть очень мала, интеграл берется по объему источников, δ -функция показывает, что транзакция идет с симметричным запаздыванием и опережением. По сути, пользуясь тем же аргументом, Н. А. Козырев объяснял симметрию связи с помощью физических свойств времени [7].

Продемонстрируем соответствие эвристического уравнения (1) строгому квантовомеханическому результату, полученному для разреженного спинового газа [30]. В [30] для разбиения системы на части A и B получено следующее уравнение:

$$S_A \approx \frac{N_A N_B}{N-1} r t (2 - \log_2 e), \quad (2)$$

где $N = N_A + N_B$ — число частиц; r — число столкновений в единицу времени.

Для адаптации уравнения (1) к условиям модели (2) рассмотрим стационарный режим (сохраняя временной сдвиг, интегрируя по времени и пренебрегая несущественной постоянной интегрирования). В этом режиме (1) сводится к соотношению

$$S_d = \sigma \int_V \frac{S}{x^2} dV.$$

Рассмотрим детектор как малую часть A большой однородной системы. Источнику соответствует часть B . Тогда

$$\frac{S_A}{N_A} = \sigma \frac{S_B}{L^2} \quad (3)$$

где L — пространственный размер системы.

Теперь несколько трансформируем (2), принимая во внимание, что средняя длина свободного пробега имеет порядок L [30], т. е. $t = L / \langle v_r \rangle$. Следовательно, $rt = \sigma Ln$, где $n = N/V$. Вместе с тем $Ln \approx N/L^2$, $rt \approx \sigma N/L^2$. Принимаем $N \geq 1$. Наконец, используем натуральные логарифмы вместо двоичных (поскольку мы всегда поступали так в наших расчетах энтропии [13, 14, 16–23, 29, 43–47, 49–52]). В результате (2) приобретает вид

$$\frac{S_A}{N_A} \approx \sigma \frac{0.3863 N_B}{L^2}. \quad (4)$$

Таким образом, имеется очевидное соответствие (3) и (4) с $S_B \approx 0,3863 N_B$. Это соответствие позволяет считать уравнение макроскопической нелокальности (1), по крайней мере, неплохой аппроксимацией реальности.

Но простейшая форма уравнения (1) не учитывает поглощения промежуточной средой. Его влияние, однако, качественно весьма примечательно. В [38] доказано, что хотя уравнения теории прямого межчастичного взаимодействия симметричны по времени, его фундаментальная асимметрия (фактически в духе Н. А. Козырева) проявляется через асимметрию эффективности поглощения: поглощение запаздывающего поля является полным, а опережающего, напротив, должно быть обязательно неполным. Это ведет к тому, что уровень опережающей корреляции с помощью экранирующей среды может превысить уровень запаздывающей.

2.2. Нелокальность корреляций

Нелокальная природа макроскопических корреляций может быть тестирована двумя путями, основанными на применении аппарата причинного анализа [1, 2, 11, 12, 24, 25, 27, 41].

Первый путь заключается в проверке нарушения сильной причинности. Для любых классических переменных X и Y можно определить функцию причинности $\gamma = i_{Y|X} / i_{X|Y}$ — отношение функций независимости: $i_{Y|X} = S(Y|X) / S(Y)$, $i_{X|Y} = S(X|Y) / S(X)$, где S — соответствующие условная и безусловная шенноновские энтропии, $0 \leq i \leq 1$, уменьшение i соответствует усилению связи переменных, т. е. функции независимости ведут себя обратно корреляционной функции (в отличие от нее на них не влияет степень нелинейности связей и они несимметричны), $0 \leq \gamma \leq \infty$, отличие γ от 1 характеризует направленность связи. По определению $\gamma > 1$ означает, что Y — причина, X — следствие. Принцип сильной причинности отражает обычный временной порядок причин и следствий:

$$\gamma > 1 \Rightarrow \tau < 0, \quad (5)$$

где τ — сдвиг временного максимума корреляции Y относительно X . Нарушение (5) означает передачу сигнала в обратном времени, что является достаточным (не необходимым!) условием нелокальности.

Для квантовых переменных используется энтропия фон Неймана. Поскольку при этом условная энтропия может быть отрицательной, $-1 \leq i \leq 1$, $-\infty \leq \gamma \leq \infty$. В частности, чистое запутанное состояние соответствует $i_{Y|X} = i_{X|Y} = -1$. На квантовомеханическом уровне величина γ недостаточна для различия причин и следствий. Но оказывается, что для определения причинности вместо γ может быть использован ход времени c_2 . Понятие хода времени было впервые введено Н. А. Козыревым [8] и положено равным $c_2 = ae^2 / \hbar$, где a — безразмерная константа. При переосмыслении исходных положений причинной механики в рамках формализма причинного анализа было показано, что при сохранении козыревской физической формулировки безразмерный множитель является функцией параметров причинности и c_2 определяется следующим образом [2, 41]:

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

Легко видеть, что $c_2 < 0 \Rightarrow \gamma > 1$, $c_2 > 0 \Rightarrow \gamma < 1$, $c_2 \rightarrow \pm\infty \Rightarrow \gamma \rightarrow 1$, поэтому более общая формулировка принципа сильной причинности, пригодная для квантовых переменных, такова:

$$c_2 < 0 \Rightarrow \tau < 0.$$

Заметим, что квантовые корреляции часто трактуются как мгновенные и непричинные. Наш подход предусматривает такую возможность, но только как частный случай: $c_2 \rightarrow \pm\infty \Rightarrow \gamma \rightarrow 1$.

Несмотря на изложенное, при анализе классического выхода измерительной аппаратуры можно использовать величину γ без ограничений. Практически, вычисляя по экспериментальным данным $i_{X|Y}$ и $i_{Y|X}$ как функцию временного сдвига τ , по их минимумам можно найти оптимальные временные сдвиги, соответствующие связи X и Y . Затем по величине γ относительно единицы можно установить направление причинной связи. В случае, если заведомо известно, что Y — причина (например, Y — некоторая мера активности крупномасштабного процесса-источника), а X — следствие (скажем, сигнал детектора), то для любого классического взаимодействия $\min i_{X|Y}$ будет наблюдаться только при $\tau < 0$, и этот минимум будет соответствовать $\max \gamma > 1$. Только при нелокальной транзакции X и Y возможно $\gamma > 1$ при $\tau > 0$.

Второй путь, более привычный для квантовой механики, без ссылки на какие-либо временные соотношения заключается в нарушении неравенства типа Белла. В [15, 48] выведено следующее неравенство, пригодное для применения на макроуровне:

$$i_{Z|X} \geq \max(i_{Z|Y}, i_{Y|X}), \quad (6)$$

где локальная связь переменных X , Y , Z возможна только по причинной цепи $X \rightarrow Y \rightarrow Z$.

Нарушение (6) является достаточным условием нелокальной корреляции X и Z . Заметим, что подобно всем неравенствам типа Белла нарушение (6) не исключает существования *нелокальных* скрытых переменных. Типичной скрытой нелокальной переменной

являются опережающее поле Уиллера–Фейнмана и обобщение его на квантовые амплитуды.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ПОДХОД

Поскольку производство энтропии согласно (1) нельзя изменить непосредственно, для конкретных пробных процессов и процессов-источников необходимо вывести выражения, связывающие их с наблюдаемыми:

$$\dot{S}_d = F(P_d, \{p_d\}), \quad \dot{s} = f(P_s, \{p_s\}),$$

где P_d — измеряемый параметр пробного процесса (сигнал детектора); P_s — то же для процесса-источника (индекс активности); $\{P\}$ — набор других параметров, влияющих на энтропию, которые должны быть известны.

3.1. Аппаратура

Были созданы две экспериментальные установки (ЦГЭМИ и МГТУ), включающие в себя детекторы нелокальных корреляций, основанные на трех типах пробных диссипативных процессов: спонтанных вариациях разности собственных потенциалов U слабополяризующихся электродов в электролите, спонтанных вариациях темнового тока I фотоумножителя и спонтанных вариациях дисперсии подвижности ионов d в малом объеме электролита. Хотя полная теория детекторов [22, 26, 46] достаточно сложна, окончательные линеаризованные выражения (в приближении малых амплитуд) связи изменения энтропии и сигнала выглядят просто и почти однотипно:

$$\Delta S_d \approx -\frac{1}{\sqrt{6}} \frac{|q|}{k\theta} \Delta U, \quad \Delta S_d = -\frac{\Delta I}{\langle I \rangle}, \quad \Delta S_d = -\frac{\Delta d}{\langle d \rangle}, \quad (7)$$

где q — заряд иона; θ — температура; k — постоянная Больцмана. Процесс каждого типа требует подавления влияния всех возможных классических локальных воздействий. Для электродного детектора это температура, давление, электрическое поле, химизм, концентрация и движение электролита, освещенность,

проникающая радиация (космические лучи); для фотокатодного — температура, электрическое и магнитное поле, влажность, освещенность, проникающая радиация, нестабильность питающего напряжения; для электролитического — температура, давление, химизм, концентрация, электромагнитное поле, нестабильность питающего напряжения. В обеих установках приняты всесторонние меры по экранированию и (или) контролю и учету (если полное экранирование невозможно) всех перечисленных факторов для каждого детектора. Упрощенные схемы детекторов приведены на рис. 1–3.

Установка ЦГЭМИ включает в себя расположенные рядом электродный и фотокатодный детекторы и еще один электродный детектор, удаленный на 300 м, и аппаратуру для контроля локальных помехообразующих факторов. Установка МГТУ содержит два близко расположенных электролитических детектора и контрольную аппаратуру. Расстояние между установками 40 км. Под-

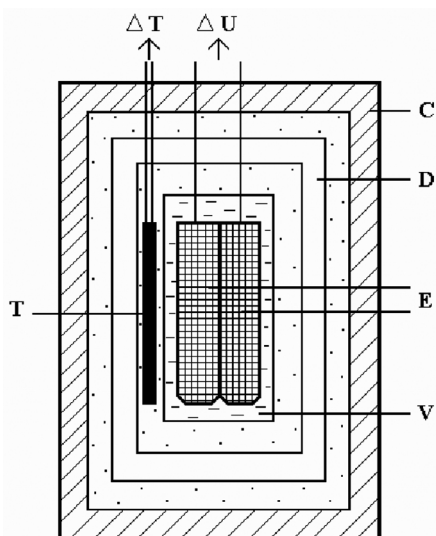


Рис. 1. Схема электродного детектора: *C* — корпус (толщина стенок 20 мм); *D* — дьюар; *V* — сосуд с электролитом; *E* — электроды (внутреннее устройство не показано); *Г* — термодатчик. Штриховкой обозначен капרון, двойной штриховкой — эбонит, точками — воздух, незаштрихованный промежуток — вакуум

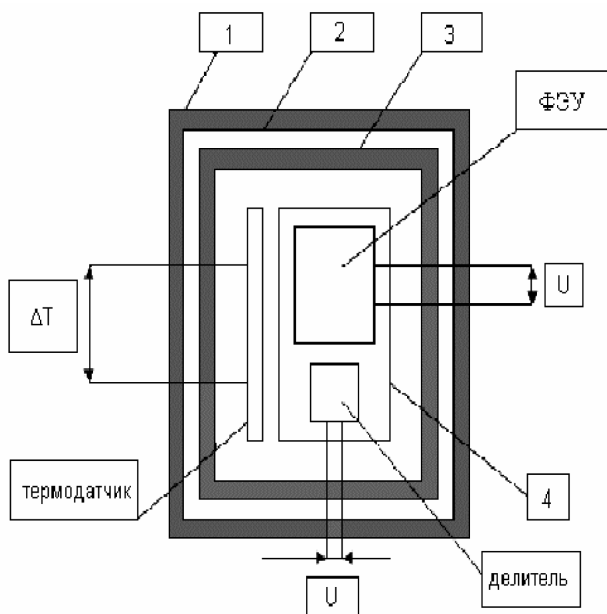


Рис. 2. Схема фотокатодного детектора: 1 — пенопластовый корпус; 2 — световой экран; 3 — дьюар; 4 — электростатический медный экран

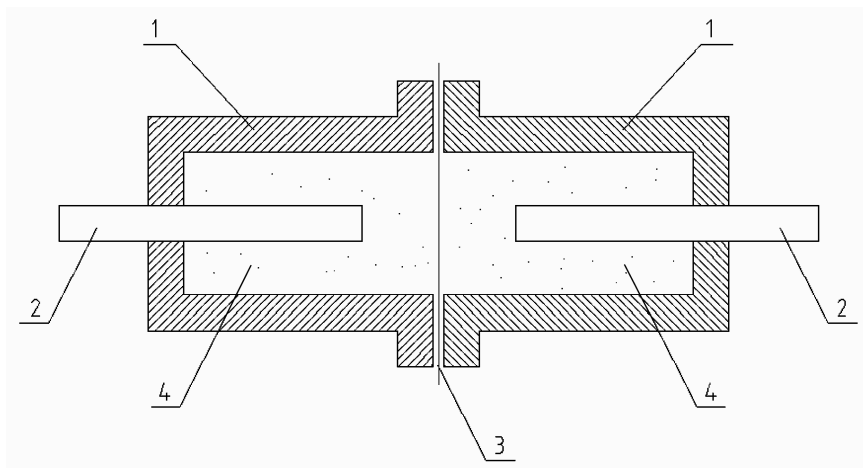


Рис. 3. Схема электролитического детектора: 1 — разъемный корпус; 2 — графитовые электроды; 3 — тонкая пленка (толщина 10 мкм) с отверстиями; 4 — электролит

робное описание устройства детекторов, их параметров, режимов измерения и анализ погрешностей приведены в [5, 16, 20–22, 26, 44, 50, 52].

3.2. Методика

Эксперименты выполнялись как с искусственно возбуждаемыми, так и с естественными крупномасштабными диссипативными процессами-источниками. В качестве искусственных источников использовались, главным образом, фазовые переходы. Результаты экспериментов с ними [5, 20, 21, 26] качественно подтвердили аналогичные результаты экспериментов Н. А. Козырева [8], но поскольку процессы, инициированные наблюдателем, не должны нарушать сильной причинности [31], они могут вызывать только запаздывающую реакцию детектора. Поэтому основные усилия были сосредоточены на изучении в долговременных экспериментах реакции детекторов на естественные процессы в окружающей среде с большой случайной компонентой. Элементарные оценки согласно (1) (в соответствии с диссипирующей энергией и расстоянием) показывают, что нелокальные корреляции могут быть установлены в первую очередь с процессами солнечной, геомагнитной и метеорологической активности. Известно, что условием установления нелокальных корреляций для диссипативных процессов служит существование общего термостата (в частности, электромагнитного поля). Очевидно, что такой термостат для указанных процессов имеется. Важно также то, что в силу ограниченности ресурса запутанности число процессов, с которыми может коррелировать пробный процесс, невелико (в этом принципиальное отличие квантовых корреляций от классических), поэтому если корреляция с перечисленными источниками окажется достаточно велика, маловероятно существование каких-либо других источников, выпавших из поля зрения. Тем не менее для выделения вкладов различных источников требовалось разделение сигналов, выполнявшееся стандартными методами частотной и временной фильтрации.

Измерения выполнялись непрерывно сериями длительностью примерно от месяца до трех лет с 1993 по 2004 гг. Дискретизация

данных при обработке от 1 мин до 1 ч. Сигналы детекторов сопоставлялись между собой и с индексами активности полученными соответствующими каналами установок (внутренняя температура детекторов, лабораторная температура, локальное магнитное поле), космофизической обсерваторией ИЗМИРАН (атмосферное давление, поток космических лучей) и со стандартными международными гелиогеофизическими данными (индексы глобальной геомагнитной активности, поток солнечного радиоизлучения на девяти стандартных частотах и поток рентгеновского излучения Солнца).

Данные обрабатывались методами спектрального, корреляционного и причинного анализа. Перед применением двух последних для изучения опережающих эффектов данные подвергались предфильтрации, подавляющей детерминированные (периодические) компоненты, что существенно увеличивало отношение сигнал/шум.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ЕСТЕСТВЕННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ

В разделе кратко описываются наиболее важные для данной статьи результаты. Полное описание результатов приведено в статьях [5, 13–19, 22, 23, 43–47, 49–52].

4.1. Связь сигналов разных детекторов

Сигналы детекторов разных типов оказались синхронно-коррелированными. Не коррелирована лишь высокочастотная составляющая (периоды $T < 1$ сут, в которые шум фотокатодного и электролитического детекторов имеет разный характер, а у электродного практически отсутствует). На рис. 4 приведен фрагмент синхронной записи удаленных на 40 км фотокатодного и электролитического детекторов, а на рис. 5 — их корреляционная функция.

Видно, что высокий корреляционный максимум (около 0,8) наблюдается при нулевом временном сдвиге. Единственным общим локальным фактором, не полностью подавленным системами экранирования, в данном случае могут быть остаточные вариации вну-

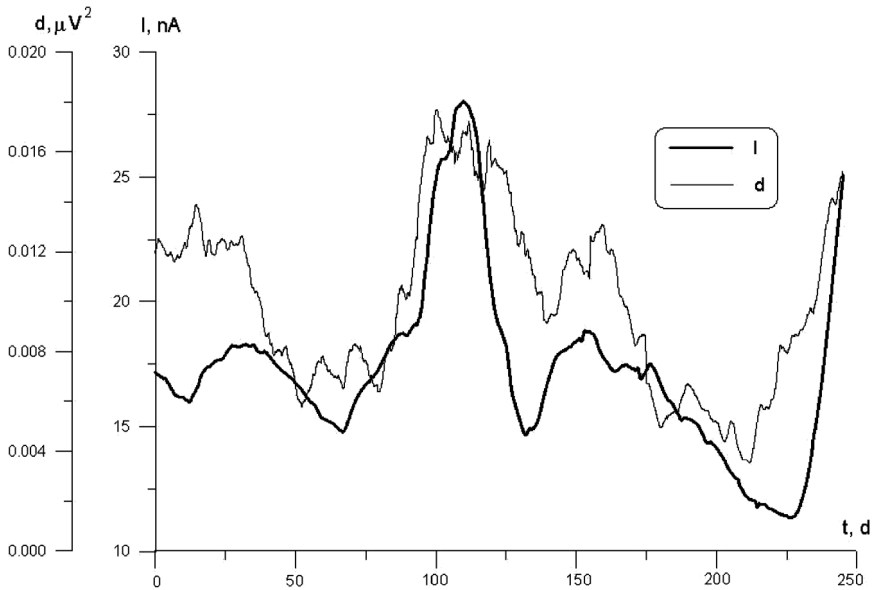


Рис. 4. Синхронные вариации сигналов фотокатодного детектора I (толстая линия) и детектора подвижности ионов d (тонкая линия): t — время в сутках. Реализация 17.01.1997 – 19.09.1997

тренней температуры детекторов, коррелирующие с вариациями атмосферной температуры. Но системы пассивного термостатирования этих детекторов существенно различаются, и нулевой сдвиг времени максимума корреляции невозможен. Кроме того, анализ частных корреляций показал, что исключение влияния внутренних температур ведет к повышению корреляций сигналов детекторов, следовательно, эти температуры не являются общей причиной.

Уровень корреляции не зависит от типа детекторов и их удаленности в пределах 40 км. Так, корреляция удаленных на 300 м электродных детекторов при нулевом сдвиге времени также максимальна и равна $0,68 \pm 0,01$, а частная корреляция, исключая связь с внутренней температурой, составляет $0,74 \pm 0,01$. Другой потенциально возможный общий фактор для электродных детекторов, не исключенный экранированием, — вариации потока космических лучей — оказался статистически незначимым (корреляция с ним не сильнее 0,3).

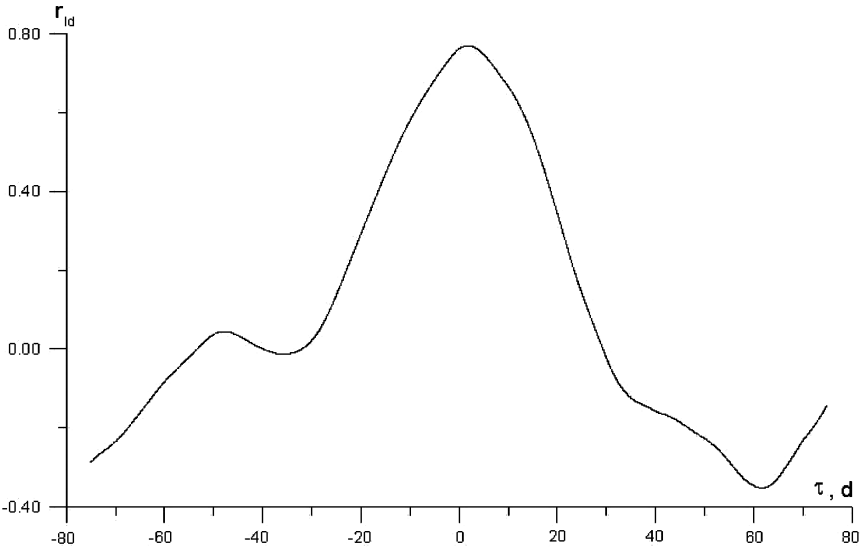


Рис. 5. Корреляционная функция сигналов фотокатодного детектора l и детектора подвижности ионов d : τ — сдвиг времени в сутках. Максимум корреляции соответствует $\tau = 0$. Данные подвергнуты низкочастотной фильтрации ($T > 20$ сут)

Более подробный анализ [5, 16, 19, 22, 23, 44, 51, 52] также подтверждает, что корреляция сигналов детекторов не может быть объяснена какими-либо локальными причинами.

4.2. Амплитуды реакции детекторов на естественный процесс

Общими причинами, вызывающими отклик детекторов, оказались (в порядке убывания устойчивости наблюдаемых эффектов) солнечная, геомагнитная, метеорологическая, а также ионосферная активность. Для детерминированных компонент наблюдается только запаздывающая реакция, для случайной — запаздывающая и опережающая, причем последняя преобладает.

Но отложим обсуждение вопроса о самой важной особенности явления — наблюдаемости опережающей реакции — и рассмотрим вопрос о ее амплитуде и соответствии этой реакции предсказанию

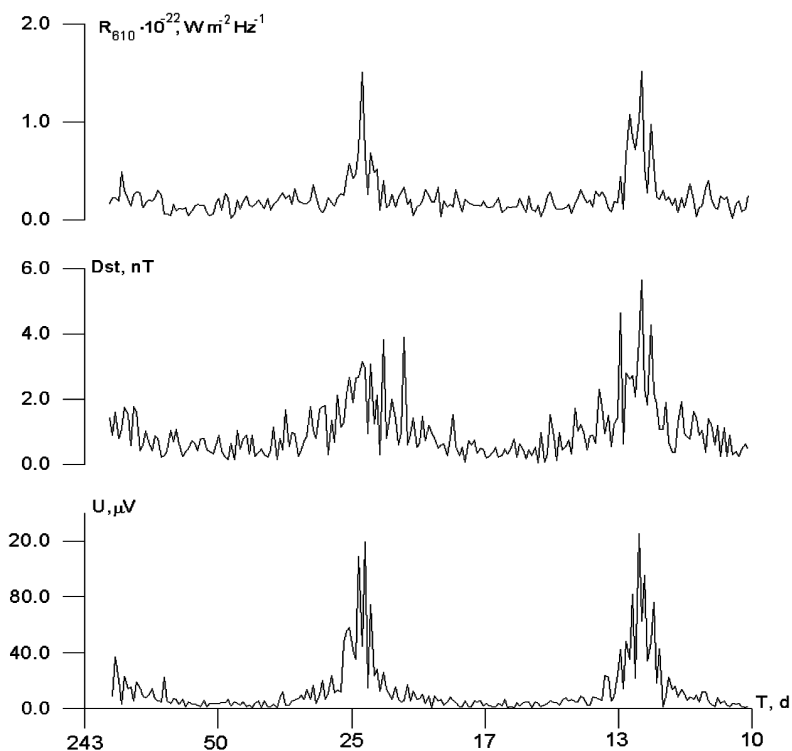


Рис. 6. Амплитудные спектры солнечной R_{610} , геомагнитной Dst активностей и сигнала электродного детектора U в диапазоне периодов T от 10 до 243 сут. Реализация 26.10.1994 – 11.02.1996

уравнения макроскопической нелокальности (1). Подчеркнем, что рассматриваемые далее индексы активности отражают производство энтропии в источниках, но не локальное воздействие на детекторы. Последние полностью нечувствительны к вариациям солнечного радиоизлучения, геомагнитного поля, атмосферного давления и т. п.

Наиболее устойчива реакция детекторов на процессы солнечной и геомагнитной активности. Анализ связей сигналов детекторов с солнечным радиоизлучением на девяти стандартных частотах в диапазоне 245–15400 МГц [5, 16] показал, что корреляция закономерно меняется с частотой и достигает максимума

в средней полосе этого диапазона (частоты 610, 1415 и 2800 МГц). Эта полоса соответствует излучению с уровня нижней короны — верхней хромосферы, т. е. с уровня максимальной диссипации в солнечной атмосфере (уровень затухания магнитозвуковых волн). Вместе с тем оптимальная частота внутри полосы меняется год от года, что, возможно, связано с фазой цикла солнечной активности. Наблюдается нелокальная реакция на геомагнитную активность (подчеркнем, при полной нечувствительности детекторов к магнитному полю, в частности, для электродного детектора при напряженности, по меньшей мере, на четыре порядка большей достигаемой при магнитных бурях). При этом корреляция сильнее, если магнитное поле характеризуется не напряженностью измеренной вблизи детектора, а глобальным D_{st} -индексом геомагнитной активности. Последний вычисляется по данным экваториальных обсерваторий и характеризует наиболее крупномасштабные (и относительно наиболее когерентные) диссипативные процессы в магнитосфере.

На рис.6 показаны амплитудные спектры потока солнечного радиоизлучения R на оптимальной частоте 610 МГц (R_{610}), D_{st} -индекса геомагнитной активности и сигнала электродного детектора U . Все спектры имеют два главных максимума на периоде вращения Солнца и его второй гармоники. Заметно, что спектр сигнала детектора более сходен со спектром солнечной, чем геомагнитной, активности — по ширине обоих спектральных максимумов, по общей форме спектра и, наконец, по отношению амплитуд первой и второй гармоник: для U оно равно 0,95, для R_{610} — 0,99, для D_{st} — 0,69. Подобная картина наблюдается в спектре всех реализаций.

Корреляция спектров метеопараметров (температура, давление) с сигналами детекторов, напротив, неустойчива. Вариации давления (масштаб когерентности которых примерно на порядок больше, чем у температуры) обычно демонстрируют хорошо коррелирующие с сигналами детекторов максимумы в диапазоне естественного синоптического периода (5–10 сут) [13].

При проверке соответствия наблюдаемых амплитуд сигналов уравнению (1) необходимо учитывать приближенный характер самого уравнения, хотя бы в силу того, что сечение оценено в нем с точностью до порядка (10^{-20} м^2), поэтому и экспериментальную

оценку имеет смысл осуществлять в рамках простой модели для расчета интеграла в правой части (левая часть дается формулами (7)). Среди перечисленных процессов удобную возможность предоставляет процесс геомагнитной активности, поскольку вариации магнитного поля легко могут быть соотнесены с диссипацией токов в магнитосфере. Производство энтропии имеет вид

$$\dot{s} = \frac{\langle E^2(f) \rangle}{\rho k \theta} = \frac{|Z(f)|^2 \langle F^2(f) \rangle}{\rho k \theta}, \quad (8)$$

где E — электрическое поле; f — частота; ρ , θ — удельное сопротивление и температура среды соответственно; Z — импеданс; F — напряженность магнитного поля. Величины Z и ρ для простоты можно считать скалярными. Подставляя соотношение (8) в (1) и используя известные свойства электромагнитного поля магнитосферного источника, можно допустить следующее упрощение. Во-первых, поле F хорошо аппроксимируется плоской волной, и, следовательно, множитель F^2 можно вынести из-под знака интеграла. Во-вторых, используем квазистационарное приближение импеданса плоской волны в однородной среде: $|Z(f)|^2 = 2\pi f \mu_0 \rho$. Зависимость от ρ исчезает, для спектральных амплитуд, как трудно показать [16, 19, 22, 23, 29, 44, 52], соотношение

$$\frac{U(f)}{F^2(f)} = \text{const} \quad (9)$$

является частотно независимым и аналогично для $I(f)$ и $d(f)$. Для оценки берется комбинация соотношений (1) (в приближении плоской волны), (8) и (7). В этом приближении источник характеризуется двумя параметрами: толщиной динамо-слоя h и температурой θ , принятые оценочные значения которых $h \approx 1,3 \cdot 10^6$ м, $\theta \approx 1,3 \cdot 10^3$ К. Поскольку в диапазоне периодов от полумесяца и более очевидно сильное влияние солнечной активности (см. рис. 6), для оценок принимается более короткопериодный диапазон, в котором геомагнитная активность велика, но длиннее двух суток, поскольку на более коротких периодах Dst -индекс вследствие процедуры вычисления становится менее представительным. Однако как раз в этом окне возможна нелокальная помеха от синоптической активности. Следовательно, для анализа необходимо выбрать

достаточно длинные временные отрезки со спокойными погодными условиями.

В результате было показано [14, 46], что равенство типа (9) выполняется, а оценки по данным детекторов всех трех типов действительно близки к теоретической оценке, принятой в (1): по данным электродного детектора $\sigma \approx 8 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2$, по данным фотокатодного $\sigma \approx 5 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2$, по данным электролитического — $\sigma \approx 6 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2$. Таким образом, уравнение (1) действительно позволяет верно предсказать порядок величины сигнала детектора.

4.3. Опережающие нелокальные корреляции

Важнейшим обнаруженным фактом стала надежно выявленная опережающая реакция детекторов на случайные природные источники всех упомянутых видов. Оба неравенства (5) и (6) нарушаются. Максимум функции корреляции сигналов детекторов и индексов активности процессов-источников наблюдается при опережении порядка 10 ч – 100 сут. Величина его при этом достигает 0,5–0,95. Опережение и величина корреляции вырастают с ростом пространственного масштаба источников. Опережающая корреляция превышает запаздывающую в 1,1–2,6 раза.

Реакция на метеорологическую активность весьма изменчива от реализации к реализации как по величине, так и по сдвигу времени. В качестве индексов активности выбирались случайные вариации температуры воздуха в лаборатории (масштаб порядка 10 м), приземной температуры воздуха в Москве (масштаб порядка 100 км) и атмосферное давление (масштаб порядка 1000 км) [13, 16, 22, 23, 44, 51, 52]. Оказалось, что опережающая корреляция сильнее запаздывающей, запаздывание и опережение соответствующих главных максимумов в первом случае равны ± 27 ч, во втором — ± 13 сут, в третьем запаздывающий максимум становится незначимым, а опережающий наблюдается при сдвиге времени 69–73 сут. В первых двух случаях наблюдается третий, синхронный («мгновенный»), пик корреляции (как и в экспериментах Н. А. Козырева и В. В. Насонова [9, 10]), по уровню промежуточный между запаздывающим и опережающим, который может быть объяснен интерференцией соответствующей пары сигналов. В последнем

случае уровень опережающей корреляции достигает $0,86 \pm 0,01$, соответствующий минимум функции независимости — $i_{X|Y} \approx 0,30$, а максимум функции причинности $\gamma \approx 2,3$. Это позволило путем простого сдвига реализаций показать, что соответствующим образом отфильтрованный сигнал детектора прогнозирует синоптическую активность с заблаговременностью около 2,5 месяца [13, 44]. Однако при сильной нестационарности корреляции возможность такой апостериорной демонстрации прогноза не означает его реальной практической возможности.

Комбинация измерений сигнала детектора, внутренней и внешней температур позволила осуществить проверку выполнения неравенства (6). Оказалось, что для запаздывающей связи сигнала с внешней температурой это неравенство выполняется, а для опережающего надежно нарушается [16, 22, 23, 51, 52].

Методом наложения эпох была выявлена опережающая реакция сигнала электродного детектора (динамический диапазон которого больше, чем у других типов) на внезапные ионосферные возмущения, особенно на внезапные усиления атмосфериков [16, 19, 22, 51, 52]. Время опережения составляет примерно 10 сут, но в целом этот источник оказался самым слабым.

Основные усилия были сконцентрированы на изучении опережающего эффекта солнечной и геомагнитной активности, поскольку первая является сильнейшим источником и очевидной причиной для второй. Оба процесса имеют большую случайную компоненту, детерминированные компоненты имеют хорошо известные периоды и, следовательно, могут быть легко подавлены предфильтрацией.

На рис. 7 приведены некоторые результаты причинного анализа солнечной активности R (на частоте 2800 МГц) и сигнала электродного детектора U (по данным за 1997 г. — года начала очередного цикла солнечной активности). В области опережения ($\tau > 0$) величины функции независимости (U от R) существенно меньше, чем в области запаздывания ($\tau < 0$), а функция причинности существенно больше единицы. Наиболее глубокий минимум $i_{X|Y} \approx 0,47$ и наиболее высокий максимум $\gamma \approx 1,6$ наблюдается при опережении $\tau = 42$ сут. Соответствующий максимум функции корреляции равен $0,76 \pm 0,08$ [16, 44]. Рис. 7 демонстрирует нарушение нера-

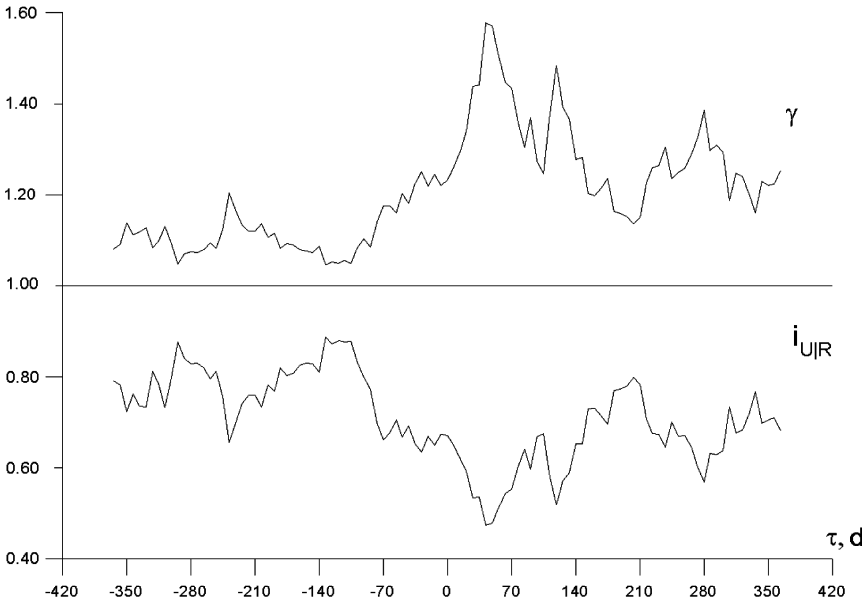


Рис. 7. Функции независимости $i_{U|R}$ и причинности $\gamma = i_{R|U}/i_{U|R}$ сигнала детектора U и потока солнечного радиоизлучения R . Отрицательный временной сдвиг τ (в сутках) соответствует запаздыванию U относительно R , положительный — опережению. Реализация U 11.12.1996–10.12.1997 (реализация R начинается годом раньше и заканчивается годом позже). Данные подвергнуты низкочастотной фильтрации ($T > 7$ сут)

венства (5). Подобная картина, хотя и менее контрастная, характеризует связь сигнала детектора с геомагнитной активностью [13, 18, 47, 50].

Проверка неравенства (6) учитывает, что любое локальное воздействие солнечной активности на детектор не может миновать магнитосферы, т. е. осуществляется по причинной цепи $R \rightarrow D_{st} \rightarrow U$. Эта проверка выполнялась неоднократно и показала нарушение (6) [14, 15, 43, 49]. Так, по наиболее точным данным эксперимента 2001–2003 гг., величины функций независимости (при оптимальной частоте R , в данном случае 1415 МГц): $i_{U|R} = 0,46^{+0,01}_{-0,02}$, $i_{U|D_{st}} = 0,51^{+0,00}_{-0,02}$, $i_{D_{st}|R} = 0,83^{+0,00}_{-0,02}$. Неравенство (6) нарушено. Выбор частоты не критичен, на соседних частотах 610 и 2800 МГц оно нарушено только в несколько меньшей степени.

Таким образом, наблюдаются оба достаточных условия не-локальности макроскопических корреляций — нарушение неравенств (5) и (6).

Как отмечалось ранее, детерминированные компоненты активности источников вызывают только запаздывающую реакцию детекторов. Поэтому для увеличения отношения сигнал/шум в опережающей области требуется подавление предварительной фильтрацией главных периодических компонент, соответствующих суточным, 27-суточным (средний период солнечного вращения), и годовых вариаций, а также их гармоник. Для примера, приведенного на рис. 7, оказалось достаточно низкочастотной фильтрации с граничным периодом $T > 7$ сут, но, как правило, требуется низкочастотная фильтрация $T > 28$ сут или полосовая фильтрация в диапазоне периодов $28 < T < 365$ сут или $28 < T < 183$ сут. Полосовая фильтрация особенно важна для выделения опережающей корреляции с геомагнитной активностью.

Наличие опережающей корреляции позволило продемонстрировать возможность прогноза случайной компоненты солнечной и геомагнитной активности по сигналу детектора путем сдвига реализаций [13–18, 43–47, 49, 50]. Но для реального прогноза такой простейший подход не пригоден. Во-первых, процессы далеки от δ -коррелированных, и, следовательно, большие ошибки неизбежны. Во-вторых, процессы нестационарны, и положение главного корреляционного максимума не стабильно. Опережение 42 сут (см. рис. 7, 8, 10) довольно типично, но для разных реализаций оно меняется в широких пределах (33–130 сут).

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОГНОЗЫ СЛУЧАЙНОЙ КОМПОНЕНТЫ

Для решения проблемы получения реального прогноза был разработан метод, основанный на свертке импульсной переходной характеристики g с множеством n предшествующих значений сигнала детектора X , определяющей прогнозируемый параметр Y :

$$Y(t) = \int_{t_1}^{t_n} g(\tau) X(t - \tau) d\tau. \quad (10)$$

Сначала интегральное уравнение (10) решается на обучающем интервале данных некоторой оптимальной длины и находится характеристика g (обратная задача). (Подробности метода решения описаны в [48].) Затем найденная величина g используется на следующем интервале данных сигнала детектора, заканчивающимся последним измеренным значением, и прогнозируется одно значение Y с определенной заблаговременностью (прямая задача). На следующий день обучающий интервал подтягивался вперед, процедура повторяется и прогнозируется следующее значение Y . Это минимизирует влияние нестационарности. Устойчивость результата улучшается оптимальной постфильтрацией (цена небольшого уменьшения заблаговременности).

Этот алгоритм был применен в режиме имитации реального прогноза ко всем полученным в наших экспериментах непрерывным записям сигналов детекторов достаточной длины: не менее года для R и двух лет для D_{st} (из-за сокращения длины рядов при полосовой фильтрации). Все данные получены с участием электродных детекторов, поскольку эксперименты с ними начались раньше остальных и они оказались наиболее надежными, показав минимальное число технических сбоев.

Качество прогноза оценивалось абсолютной среднеквадратической погрешностью ϵ — отклонением прогностической и фактических кривых в единицах, принятых для самих индексов активности (т. е. $10^{-22}\text{Вт}/(\text{м}^2\text{Тц})$ для R и в нТл для D_{st}). Поскольку в (10) использовано линейное приближение, первые примеры, приведенные далее, предваряются демонстрацией корреляционных функций.

5.1. Солнечная активность

На рис. 8 показана корреляционная зависимость сигнала детектора U от солнечной активности R на частоте 610 МГц по наиболее длинной непрерывной серии наблюдений. Максимум корреляции наблюдается при опережении U относительно R на 42 сут.

На рис. 9 представлен прогноз R по U с момента окончания первичного обучающего интервала. Расчет по (10) велся с заблаговременностью 42 сут, уменьшение эффективной заблаговременности результата до 35 сут произошло в результате оптимальной

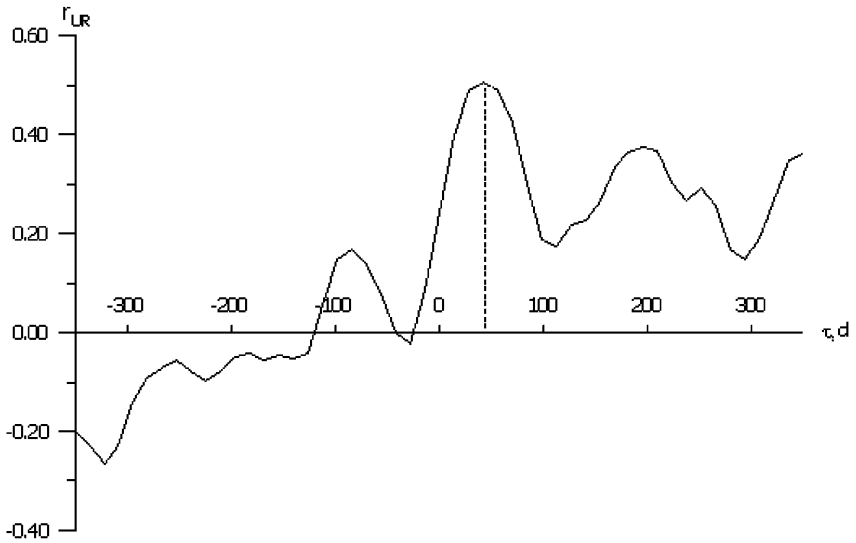


Рис. 8. Корреляционная функция r_{UR} сигнала детектора U и солнечной активности R . Реализация U 26.10.1994–24.07.1997. Данные подвергнуты низкочастотной фильтрации ($T > 28$ сут)

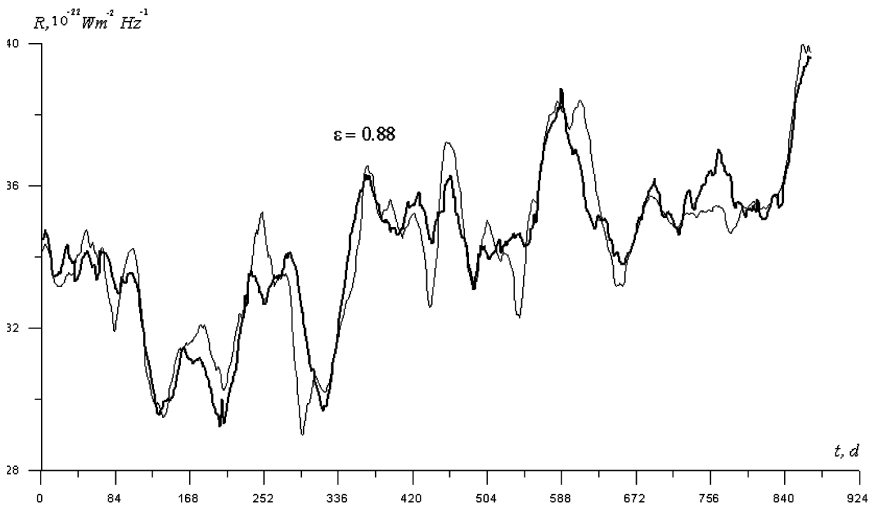


Рис. 9. Сравнение прогноза солнечной активности R с заблаговременностью 35 сут (тонкая линия) с фактическим (толстая линия). Начало отсчета времени соответствует 20.03.1995

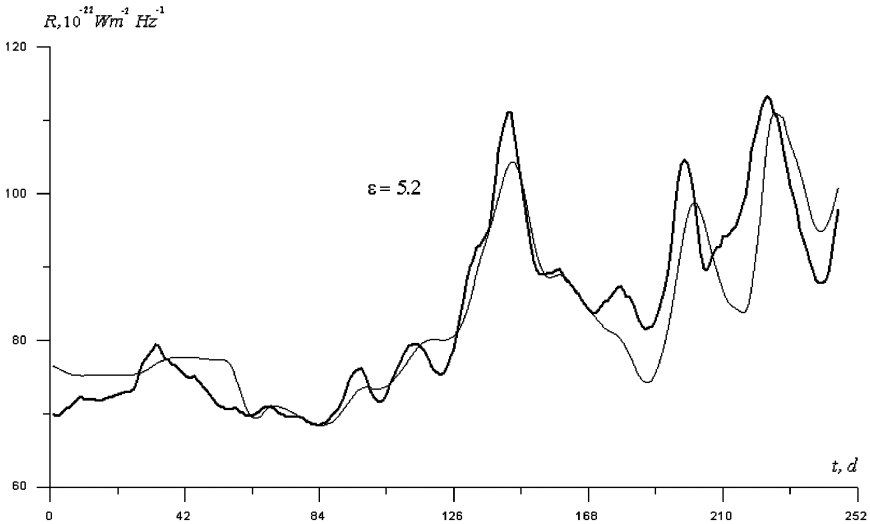


Рис. 10. Сравнение прогноза солнечной активности R (на частоте 2800 МГц) с заблаговременностью 39 сут (тонкая линия) с фактическим (толстая линия). Начало отсчета соответствует 21.03.1997

низкочастотной постфильтрации, в данном случае $T > 14$ сут. На рис. 10 представлен прогноз солнечной активности по следующему эксперименту (R на частоте 2800 МГц, соответствующая приведенной на рис. 7). Расчетная заблаговременность была также 42 сут, результирующая вследствие постфильтрации ($T > 7$ сут) составила 39 сут. Этот случай интересен тем, что прогностическая серия включает в себя начало очередного цикла солнечной активности в 1997 г. — резкий подъем R в средней части рис. 10 (именно для достаточно контрастного его отображения граничный период низкочастотной предфильтрации был выбран наименьшим — 7 сут). Как известно, точный момент начала цикла — случайное событие, и, как видно из рисунка, этот момент оказался хорошо предсказан.

На рис. 11 приведен прогноз солнечной активности по данным последнего эксперимента, допускающий наибольшую заблаговременность (максимум корреляции наблюдается при опережении 130 сут [15, 45]). Поскольку данные по детектору этой серии содержали значимую годовую вариацию, включая ее вторую гармонику, применена полосовая предфильтрация $28 < T < 183$ сут. Оптималь-

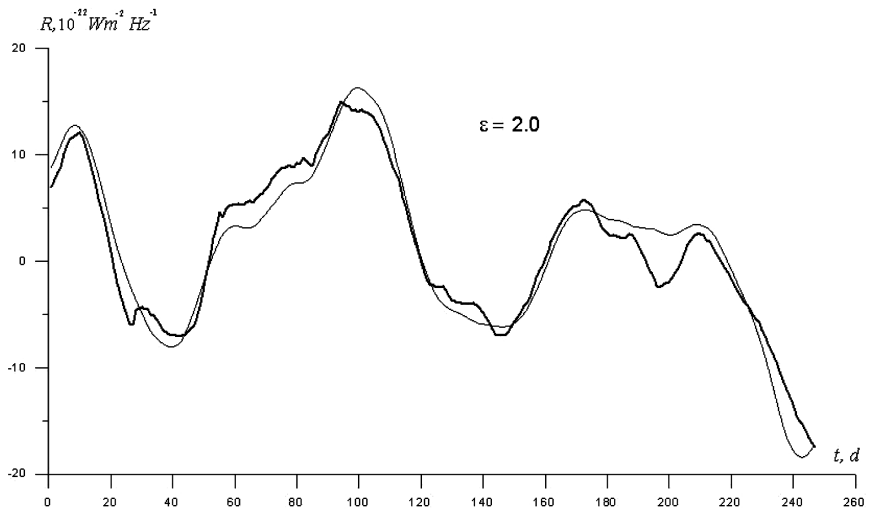


Рис. 11. Сравнение прогноза солнечной активности R (на частоте 1415 МГц) с заблаговременностью 123 сут (тонкая линия) с фактическим (толстая линия). Начало отсчета соответствует 20.02.2003

ная постфильтрация $T > 14$ сут определяет результирующую заблаговременность 123 сут.

5.2. Геомагнитная активность

На рис. 12 показана корреляционная функция сигнала детектора U и геомагнитной активности D_{st} по тому же наиболее длительному ряду данных, что и на рис. 8, но с полосовой предфильтрацией, подавляющей детерминированные компоненты магнитного поля. Главный максимум корреляции также наблюдается при опережении 42 сут (запаздывание Dst относительно R , равное обычно 1–2 сут, оказалось незаметным при данном уровне сглаживания). На рис. 13 представлен геомагнитный прогноз по этому ряду с той же постфильтрацией и с тем же опережением что и соответствующий солнечный прогноз (см. рис. 9), лишь длина прогностической серии здесь короче в результате сокращения ряда при полосовой предфильтрации. Отметим, что погрешность прогноза ~ 2 нТл отвечает требованием любых практических приложений.

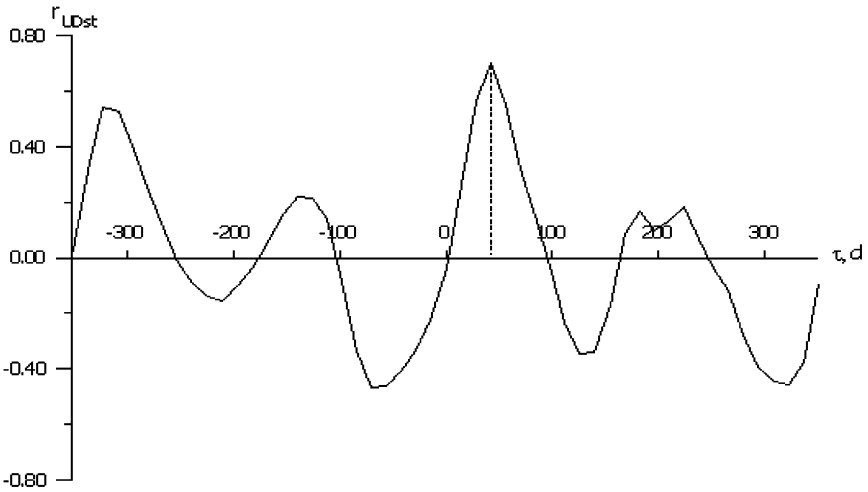


Рис. 12. Корреляционная функция r_{UDst} сигнала детектора U и геомагнитной активности Dst . Реализация U 26.10.1994–24.07.1997. Данные подвергнуты полосовой фильтрации ($364 > T > 28$ сут)

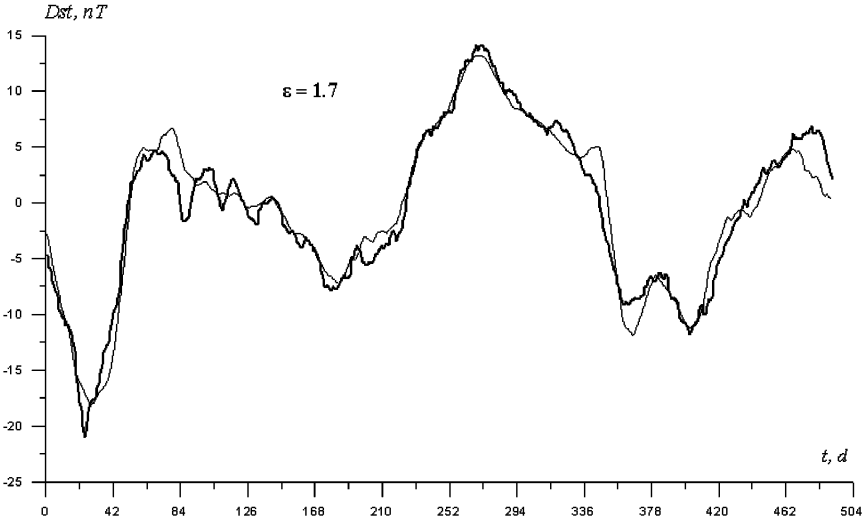


Рис. 13. Сравнение прогноза геомагнитной активности Dst с заблаговременностью 35 сут (тонкая линия) с фактическим (толстая линия). Начало отсчета соответствует 19.09.1995

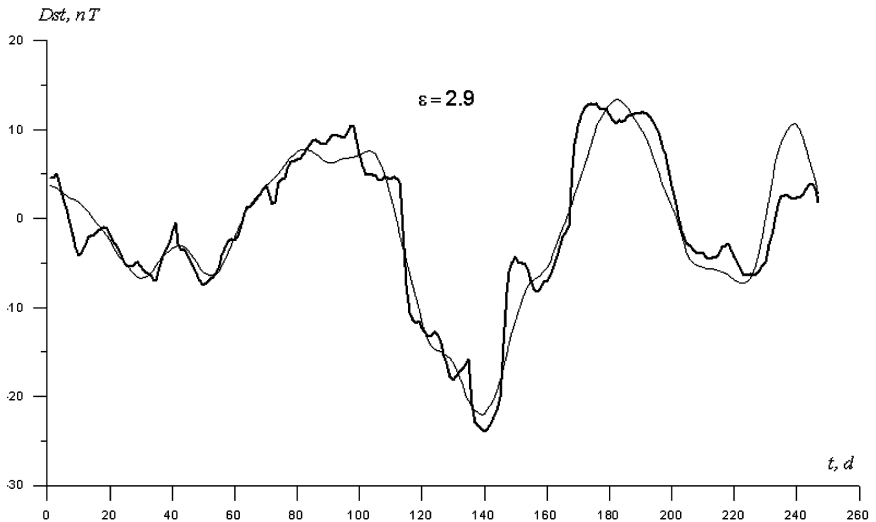


Рис. 14. Сравнение прогноза геомагнитной активности Dst с заблаговременностью 123 суток (тонкая линия) с фактической кривой (толстая линия). Начало отсчета соответствует 20.02.2003

Наконец, на рис. 14 представлен геомагнитный прогноз по тому же ряду, с той же пред- и постфильтрацией и с той же заблаговременностью (максимум корреляции — при опережении 130 сут [14, 46]), что и солнечный прогноз на рис. 11. Видно, что геомагнитный прогноз с максимальной заблаговременностью также достаточно успешен. Результаты, приведенные на рис. 11 и 14, показывают, что алгоритм на основе (10) выделяет из сигнала детектора прогностическую информацию о двух процессах даже без спектрально-временного разделения сигналов. Все вышеописанные прогнозы являются фоновыми, так же как и классические (детерминистские) долгосрочные прогнозы. Эксперименты выявили наличие опережающей реакции со сдвигом времени того же порядка и для индивидуальных мощных рентгеновских событий (вспышек класса X). Но при этом оказалось, что одной вспышке соответствует несколько всплесков сигнала детектора в интервале опережений 1–2 мес, причем наибольший из них — при опережении на 42 сут [49]. Однако редкость таких событий не позволила пока изучить этот эффект достаточно для прогностических приложений.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Только спустя четверть века после ухода из жизни Н. А. Козырева его идеи и результаты начинают по-настоящему влиять на развитие физики. Это влияние весьма разнопланово. Во-первых, причинная механика находит приложение в физических задачах (работы М. Л. Арушанова, Л. С. Шихобалова и др.), не затронутых в данной статье. Во-вторых, на основе козыревского понимания причинности (ее определения *до* введения временного порядка) сформировался и получил разнообразное применение — от классического электромагнетизма, гидродинамики и т. п. до квантовой механики — аппарат причинного анализа. В-третьих, идея Н. А. Козырева о взаимодействии процессов благодаря физическим свойствам времени оказалась, вероятно, тождественной новой, пока еще только зарождающейся идее о макроскопической квантовой нелокальности при конструктивной роли диссипации. Наконец, в-четвертых, идея Н. А. Козырева о существовании сигналов из будущего удивительно созвучна новым идеям, вытекающим из теории прямого межчастичного взаимодействия. И дело не только в этом созвучии, а в том, что идеи Н. А. Козырева в сочетании с новейшими идеями квантовой механики удивительным образом открывают путь к эксперименту.

Мы описали развитие «запретной» идеи Н. А. Козырева — возможность наблюдения будущего как существующей реальности. Мы продолжаем восхищаться идеей, потому что эффект подтвержден экспериментально вплоть до возможности прогностических приложений и потому, что «запрет» теоретически снимается так же элегантно, как квантовая механика сняла парадокс ЭПР. Буквально *так же*, потому что основа одна! Как и в экспериментах Н. А. Козырева, в наших экспериментах показана возможность «видеть» будущее, но только в той его части, на которую не может повлиять ни наблюдатель, ни природа. А именно, наблюдается случайная компонента процессов, не детерминированная предшествующей эволюцией, т. е. случайная компонента будущего как существующая реальность. Это исключает общеизвестные парадоксы, обычно служащие аргументом против возможности существования сигналов в обратном времени. В частности, это не накладывает никаких ограничений на свободу воли.

Хотя Н. А. Козырев особо не акцентировал внимания на этом обстоятельстве, контекст его астрофизических экспериментов [7, 9, 40] именно таков: существует возможность наблюдения именно таких будущих состояний, которые можно регистрировать, но нельзя изменить, не вступая в противоречия с теорией относительности (события разделены нулевым интервалом). Более того, так же, как и Солнцу, случайная компонента активности присуща звездам и другим исследованным Н. А. Козыревым и В. В. Насоновым объектам. Нестационарность некоторых из них подчеркнута в [9].

В наших экспериментах со значительно более близкими источниками особую роль играет обмен запутанностью по длинной диффузионной цепи, в которой события разделены нулевым интервалом только на микроуровне, что дает результирующий на макроуровне соответствующий квазиинтервал. В итоге достигаются большие значения запаздывания и опережения. Но они велики только в релятивистском смысле по сравнению с расстояниями между источниками и детектором. В галактическом пространственно-временном масштабе [9, 10] эта диффузионная добавка сдвига времени становится практически незаметной, и распространение прямого и обратного сигналов эффективно происходит со скоростью света.

Конечно, представленный нами теоретический подход существенно эвристический и, вероятно, грубый. Тем не менее согласованность эвристического уравнения макроскопической нелокальности (1) как с полученным позднее и независимо точным частным квантовомеханическим результатом (2), так и с экспериментальными данными, вселяет уверенность, что в главных чертах наш подход соответствует реальности. Это подчеркивает необходимость развития теории макроскопической запутанности в духе прямого межчастичного взаимодействия, включая наличие сигналов в обратном времени.

Независимо от теоретической интерпретации точность получаемых в рамках представленного подхода прогнозов солнечной и геомагнитной активности приемлема для практических целей. При этом важно, что метод прогноза на основе нелокальных корреляций является не конкурирующим, а дополняющим применяемые эволюционные (детерминистские) методы.

Авторы благодарят Ю. В. Горохова и В. А. Мачинина за участие в экспериментальных исследованиях, Ю. С. Владимиров и А. П. Левича — за обсуждение результатов.

УКАЗАТЕЛЬ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Арушанов М. Л., Коротаев С. М.* Причинный анализ и его применение для изучения физических процессов в атмосфере // *Метеорология и гидрология*. 1994. № 6. — С. 15–22.
2. *Арушанов М. Л., Коротаев С. М.* От реляционного времени к субстанциональному. — Ташкент: Изд. ГУ Гидрометеорологии Узбекистана, 1995. — 239 с.
3. *Башаров А. М.* Декогеренция и перепутывание при радиационном распаде двухатомной системы // *Журн. exper. и теор. физики*. 2002.— Т. 121. Вып. 6. — С. 1249–1260.
4. *Владимиров Ю. С., Турыгин А. Ю.* Теория прямого межчастичного взаимодействия. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 208 с.
5. *Дворук С. К., Коротаев С. М., Морозов А. Н и др.* Экспериментальные исследования необратимых процессов в электролитах // *Прикл. мех. и технологии машиностроения*. Вып. 1(4). Н. Новгород, 1998. — С. 61–66.
6. *Дигурова Ю. Г., Соловьев М. И., Голяк И. С.* Определение температурных коэффициентов приборов при длительных исследованиях Ч. 1. // *Необратимые процессы в природе и технике*. — М.: ФИАН, 2005. — С. 205–208.
7. *Козырев Н. А.* Астрономическое доказательство реальности четырехмерной геометрии Минковского // *Проблемы исследования Вселенной*. Вып. 9. — М., 1980. — С. 85–93.
8. *Козырев Н. А.* Избранные труды. — Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1991. — 448с.
9. *Козырев Н. А., Насонов В. В.* Новый метод определения тригонометрических параллаксов на основе измерения разности между видимым и истинным положением звезд // *Проблемы исследования Вселенной*. Вып. 7.— М., 1978. — С. 168–179.
10. *Козырев Н. А., Насонов В. В.* О некоторых свойствах времени, обнаруженных астрономическими наблюдениями // *Проблемы исследования Вселенной*. Вып. 9. — М., 1980. — С. 76–84.
11. *Коротаев С. М.* О возможности причинного анализа геофизических процессов // *Геомagnetизм и аэрономия*. 1992. Т. 32. № 5. — С. 27–33.
12. *Коротаев С. М.* Роль различных определений энтропии в причинном анализе геофизических процессов и их приложение к электромагнитной индукции в морских течениях // *Геомagnetизм и аэрономия*. 1995. Т. 35. № 3. — С. 116–125.

13. Кортаев С. М., Морозов А. Н., Горохов Ю. В и др. Экспериментальное исследование нелокальности некоторых магнитосферно-ионосферных и тропосферных процессов // Необратимые процессы в природе и технике: Труды Второй всерос. конф. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. — С. 12–35.
14. Кортаев С. М., Морозов А. Н., Сердюк В. О. и др. Экспериментальное исследование нелокальности крупномасштабных геомагнитных диссипативных процессов // Необратимые процессы в природе и технике. Вып. 1. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. — С. 22–38.
15. Кортаев С. М., Морозов А. Н., Сердюк В. О. и др. Экспериментальное исследование опережающих нелокальных корреляций процесса солнечной активности // Изв. вузов. Физика. 2007. № 4. — С. 26–33.
16. Кортаев С. М., Морозов А. Н., Сердюк В. О. и др. Проявление макроскопической нелокальности в некоторых естественных диссипативных процессах // Изв. вузов. Физика. 2002. № 5. — С. 3–14.
17. Кортаев С. М., Сердюк В. О., Горохов Ю. В. Обратимость в необратимом времени // Изучение времени: парадигмы, концепции, модели, гипотезы, идеи. — Шахты: ЮРГУЭС, 2005. — С. 84–91.
18. Кортаев С. М., Сердюк В. О., Наливайко В. И. и др. Экспериментальное исследование макроскопической нелокальности некоторых гелиогеофизических процессов // Исследования в области геофизики. — М.: ОИФЗ РАН, 2004. — С. 167–174.
19. Кортаев С. М., Сердюк В. О., Сорокин М. О. Проявление макроскопической нелокальности в геомагнитных и солнечно-ионосферных процессах // Геомагнетизм и аэрономия. 2000. Т. 40. № 3. — С. 56–64.
20. Кортаев С. М., Сердюк В. О., Сорокин М. О. и др. Экспериментальное исследование нелокальности контролируемых диссипативных процессов // Физическая мысль России. 2000. № 3. С. 20–26.
21. Кортаев С. М., Сердюк В. О., Сорокин М. О. и др. Экспериментальное исследование эффекта нелокальности искусственно возбуждаемых диссипативных процессов // Вестн. ОГГГН РАН. 2000. № 4.
22. Кортаев С. М., Сорокин М. О., Сердюк В. О. и др. Экспериментальное исследование нелокального взаимодействия макроскопических диссипативных процессов // Физическая мысль России. 1998. № 2. — С. 1–17.
23. Кортаев С. М., Сорокин М. О., Сердюк В. О. и др. Экспериментальное исследование макроскопической нелокальности // Наука и технология в России. 1999. № 1(31). — С. 16–19.
24. Кортаев 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.

25. *Коротаев С. М., Шабелянский С. В., Сердюк В. О.* Обобщенный причинный анализ и его применение для изучения электромагнитного поля в море // Изв. РАН. Физика Земли. 1992. № 6. — С. 77–86.
26. *Морозов А. Н.* Необратимые процессы и броуновское движение. — М.: МГТУ, 1997. — 332 с.
27. *Хачай О. А., Коротаев С. М., Троянов А. К.* Результаты применения причинного анализа для обработки скважинных данных сейсмоакустической и электромагнитной эмиссии // Вулканология и сейсмология. 1992. № 3. — С. 92–100.
28. *Benatti F., Floreanini R., Piani M.* Environment induced entanglement in Markovian dissipative dynamics // Phys. Rev. Lett. 2003. Vol. 91. — P. 070402-4.
29. *Brucner C., Vedral V., Zeilinger A.* Crucial role of quantum entanglement in bulk properties of solids // Phys. Rev. A. 2006. Vol. 73. — P. 0121101-4.
30. *Calsamiglia J., Hartmann L., Dur W.* Spin gases: quantum entanglement driven by classical kinematics // Phys. Rev. Lett. 2005. Vol. 95. — P. 1805021-4.
31. *Cramer J. G.* Generalized absorber theory and the Einstein-Podolsky-Rosen paradox // Phys. Rev. D. 1980. Vol. 22. N 2. — P. 362–376.
32. *Cramer J. G.* The transactional interpretation of quantum mechanics // Rev. Mod. Phys. 1986. Vol. 58. — P. 647–688.
33. *Dur W., Briegel H.-J.* Stability of macroscopic entanglement under decoherence // Phys. Rev. Lett. 2004. Vol. 92. — P. 1804031-4.
34. *Elitzur A. S., Dolev S.* Is there more to T?: the nature of time // Geometry, Physics and Perception / Ed. R. Buccery, M. Saniga, W. M. Stuckey. — Dordrecht: Kluwer Academic Publ., 2003. — P. 297–306.
35. *Ghosh S., Rosenbaum T. F., Aeppl G. A. et al.* Entanglement quantum state of magnetic dipoles // Nature. 2003. Vol. 425. — P. 48.
36. *Hein M., Dur W., Briegel H.-J.* Entanglement properties of multipartite entangled states under influence of decoherence // Phys. Rev. A. 2005. Vol. 71. — P. 0323501-25.
37. *Home D., Majumdar A. S.* Incompatibility between quantum mechanics and classical realism in the strong macroscopic limit // Phys. Rev. A. 1995. Vol. 52. N 6. — P. 4959–4962.
38. *Hoyle F., Narlikar J. V.* Cosmology and action-at-a-distance electrodynamics // Rev. Mod. Phys. 1995. Vol. 67. N 1. — P. 113–156.
39. *Jakobczyk L.* Entangling two qubits by dissipation // J. Phys. A. 2002. Vol. 35. — P. 6383–6391.
40. *Julsgaard B., Kozhelkin A., Polsik E. S.* Experimental long lived entanglement of two macroscopic objects // Nature. 2001. Vol. 413. — P. 400–403.
41. *Korotaev S. M.* Formal definition of causality and Kozyrev's axioms // Galilean Electrodynamics. 1993. Vol. 4. N 5. — P. 86–89.

42. Korotaev S. M. The force of time // Galilean Electrodynamics. 2000. Vol. 11. S. I. 2. — P. 29–33.
43. Korotaev S. M. Experimental study of advanced correlation of some geophysical and astrophysical processes // Internat. J. Comp. Anticipatory Systems. 2006. Vol. 17. — P. 61–76.
44. Korotaev S. M., Morozov A. N., Serdyuk V. O. et al. Experimental evidence of nonlocal transaction in reverse time // Physical Interpretation of Relativity Theory. — Moscow: BMSTU Press, 2003. — P. 200–212.
45. Korotaev S. M., Morozov A. N., Serdyuk V. O. et al. Experimental study of advanced nonlocal correlation of large scale dissipative processes // Physical Interpretation of Relativity Theory. Proc. Internat. Sci. Meeting. Moscow: BMSTU Press, 2005. — P. 209–215.
46. Korotaev S. M., Morozov A. N., Serdyuk V. O. et al. Experimental study of macroscopic nonlocality of large-scale geomagnetic dissipative processes // NeuroQuantology. 2005. Vol. 3. N 4. — P. 250–269.
47. Korotaev S. M., Morozov A. N., Serdyuk V. O. et al. Manifestation of macroscopic nonlocality in the processes of solar and geomagnetic activity // Vestn. BMSTU. 2004. Special Issue. — P. 173–185.
48. Korotaev S. M., Serdyuk V. O., Gorohov J. V. Forecast of solar and geomagnetic activity on the macroscopic nonlocality effect // Hadronic J. 2007. Vol. 30. N 1. — P. 39–56.
49. Korotaev S. M., Serdyuk V. O., Gorohov J. V. et al. Forecasting affect of macroscopic nonlocality // Frontier Perspectives. 2004. Vol. 13. N 1. — P. 41–45.
50. Korotaev S. M., Serdyuk V. O., Nalivayko V. I et al. Experimental estimation of macroscopic nonlocality effect in solar and geomagnetic activity // Physics of Wave Phenomena. 2003. Vol. 11. N 1. — P. 46–54.
51. Korotaev S. M., Serdyuk V. O., Sorokin M. O. Experimental verification of Kozyrev's interaction of natural processes // Galilean Electrodynamics. 2000. Vol. 11. S. I. 2. — P. 23–28.
52. Korotaev S. M., Serdyuk V. O., Sorokin M. O. et al. Geophysical manifestation of interaction of the processes through the active properties of time // Physics and Chemistry of the Earth. A. 1999. Vol. 24. N 8. — P. 735–740.
53. Laforest M., Baugh J., Laflamme R. Time-reversal formalism applied to bipartite entanglement: theoretical and experimental exploration // Phys. Rev. A. 2006. Vol. 73. — P. 032323-1-8.
54. Simon C., Kempe J. Robustness of multiparty entanglement // Phys. Rev. A. 2002. Vol. 65. — P. 052327-1-4.
55. Xu H., Strauch F. W., Dutta S. K. et al. Spectroscopy of three-particle entanglement in a macroscopic superconducting circuit // Phys. Rev. Lett. 2005. Vol. 94. — P. 027003-1-4.