

**БАЙКАЛЬСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО НАБЛЮДЕНИЮ
ОПЕРЕЖАЮЩИХ НЕЛОКАЛЬНЫХ КОРРЕЛЯЦИЙ
КРУПНОМАСШТАБНЫХ ПРОЦЕССОВ****С.М. Коротаев¹, Н.М. Буднев², В.О. Сердюк¹,
Ю.В. Горохов³, Е.О. Киктенко¹, А.И. Панфилов⁴**¹ЦГЭМИ ИФЗ РАН, Москва, Российская Федерация
e-mail: korotaev@igemi.troitsk.ru²НИИПФ ИГУ, Иркутск, Российская Федерация³ИЗМИРАН, Москва, Троицк, Российская Федерация⁴ИЯИ РАН, Москва, Троицк, Российская Федерация

Макроскопическая квантовая запутанность представляет собой проявление нелокальности, последовательная теория которой еще не развита. Эвристическое рассмотрение проблемы приводит к выводу о наличии в диссипативных случайных процессах опережающих нелокальных корреляций, которые были действительно обнаружены в предшествующих экспериментах. В 2012 г. начался новый эксперимент на базе Байкальской глубоководной нейтринной обсерватории. Два детектора нелокальных корреляций, измеряющих спонтанные вариации разности потенциалов слабополяризующихся электродных пар, были установлены на глубинах 52 и 1216 м, классические корреляции между ними не могут иметь места. Обработка данных выявила корреляцию между сигналами нижнего и верхнего детекторов, а также сигнала с удаленного на 4200 км детектора в Троицке. Детекторы нелокально откликаются на внешние (гелиогеофизические) процессы, связь сигналов, определенная методом причинного анализа, направлена вниз — от детектора на поверхности земли к детектору, находящемуся у дна озера Байкал. Однако эта связь подчинена квантовому принципу слабой причинности: нижний детектор откликается на процесс-источник раньше, чем верхний, а верхний — раньше, чем поверхностный. Установлена опережающая связь сигнала детектора с солнечной и гидродинамической активностью, продемонстрирована возможность их прогноза.

Ключевые слова: квантовая причинность, макроскопическая запутанность, нелокальные корреляции, время, прогноз.

**THE BAIKAL EXPERIMENT REGARDING THE OBSERVATIONS OF
LEADING NONLOCAL CORRELATIONS OF LARGE-SCALE PROCESSES****S.M. Korotaev¹, N.M. Budnev², V.O. Serdyuk¹,
Yu.V. Gorokhov³, E.O. Kiktenko¹, A.I. Panfilov⁴**¹Geoelectromagnetic Research Centre of Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Troitsk, Moscow, Russian Federation
e-mail: korotaev@igemi.troitsk.ru²Research Institute of Applied Physics of Irkutsk State University, Irkutsk, Russian Federation³Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences, Troitsk, Moscow, Russian Federation⁴Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences, Troitsk, Moscow, Russian Federation

The macroscopic quantum entanglement is the manifestation of nonlocality, the consistent theory of which has been undeveloped yet. The heuristic consideration of the problem leads to the conclusion that the leading nonlocal correlations are present in dissipative random processes, which have been really observed in the previous experiments. In 2012, a new experiment began at the Baikal Deep-Water Neutrino Observatory. Two nonlocal-correlation detectors, measuring spontaneous variations of potential difference of weakly polarized electrode pairs, were installed at depths of 52 and 1216 m; there can be no classical correlations between them. The data processing has revealed a correlation between the signals of the bottom and top detectors and the 4200 km distant laboratory-detector located in Troitsk. The detectors respond nonlocally to the external (heliogeophysical) processes; the signal correlation, determined by the causal analysis is directed downwards: from the detector on the earth's surface to the detector near the Baikal floor. However this correlation obeys the weak causality principle: the bottom detector responds earlier than the top one, and the top detector reacts earlier than the surface one. The leading correlation of the detector signal with the solar and hydrodynamic activity is found; the possibility of forecasting them is demonstrated.

Keywords: quantum causality, macroscopic entanglement, nonlocal correlations, time, forecast.

Введение. В настоящее время кажущееся нарушение принципов теории относительности в запутанных состояниях хорошо объяснено в рамках квантовой нелокальности. Мгновенные и даже опережающие корреляции возможны именно благодаря отсутствию локальных носителей информации. В свою очередь, опережающие корреляции могут иметь место не только через пространственноподобный интервал, что могло бы означать обычное нарушение временного порядка причинно не связанных событий. Согласно принципу слабой причинности, для неизвестных квантовых состояний (в других терминах для случайных процессов) опережающие корреляции через временноподобный интервал также возможны [1]. Это было доказано экспериментально для квантовой телепортации и обмена запутанностью [2–5]. Основные теоретические усилия в этой области сфокусированы на запутанности небольшого числа микрочастиц. В последнее время все большее внимание привлекает проблема макроскопической квантовой запутанности, представляющей интригующее явление, теория которого находится еще в зачаточном состоянии. При этом одним из важных результатов в развитии теории квантовой информации было открытие конструктивной роли диссипации в генерации запутанности [6–13]. Это связывает новейшие исследования с ранними экспериментальными работами, в которых наблюдались опережающие корреляции макроскопических диссипативных процессов [14, 15].

Настоящая работа посвящена исследованию опережающих макроскопических нелокальных корреляций в крупномасштабном натурном эксперименте.

Теоретический и экспериментальный подход к проблеме. Идея состояла в том, чтобы включить диссипацию в транзакционную ин-

терпретацию квантовой нелокальности в рамках теории прямо межчастичного взаимодействия (электродинамики Уиллера – Фейнмана и ее квантового обобщения) [1, 16]. Эта теория рассматривает поле прямого межчастичного взаимодействия как суперпозицию запаздывающего и опережающего полей. Последнее не наблюдается непосредственно и проявляется только через радиационное затухание, которое в свою очередь может быть связано с производством энтропии [17, 18]. Любой диссипативный процесс в конечном счете приводит к радиационному затуханию, и, следовательно, опережающее поле связывает диссипативные процессы.

Было предложено, экспериментально и теоретически проверено следующее эвристическое уравнение макроскопической запутанности [17–19]:

$$\dot{S}_d = \sigma \int \frac{\dot{s}}{x} \delta(v^2 t^2 - x^2) dV, \quad (1)$$

где \dot{S}_d – производство энтропии на частицу в пробном процессе (детекторе); \dot{s} – плотность полного производства энтропии в источниках (интеграл берется по объему источников); v – скорость распространения; $\sigma \approx \hbar^4 / (m_e^2 e^4)$ – сечение транзакции (порядка сечения атома, стремится к нулю в классическом пределе); m_e – масса электрона; e – элементарный заряд. Дельта-функция показывает, что транзакция имеет место с симметричным запаздыванием и опережением. Скорость распространения для диффузионного обмена запутыванием может быть очень мала. Соответственно, запаздывание и опережение могут быть очень велики.

Следует отметить, что уравнение (1) в простейшей форме не учитывает поглощение промежуточной средой. Однако его влияние очень специфично. Хотя уравнения электродинамики Уиллера – Фейнмана симметричны по времени, фундаментальная асимметрия времени проявляется через асимметрию эффективности поглощения: поглощение запаздывающего поля является полным, в то время как поглощение опережающего поля должно быть неполным [18, 23–25]. Это приводит к тому, что уровень опережающей корреляции через экранирующую среду может превысить уровень запаздывающей корреляции.

Экспериментальная задача заключается в установлении корреляции между пробным процессом и процессом-источником в соответствии с уравнением (1) при условии подавления всех классических локальных воздействий. Среди различных типов детекторов, наиболее надежным оказался детектор, основанный на спонтанных вариациях собственных потенциалов слабополяризующихся электродов в электролите [17–21]. Теория электродного детектора рассматривает производство энтропии в жидкой фазе. Энтропия распределения потенциала связана с полным контактным потенциалом. С учетом этого может

быть получено выражение изменения энтропии через разность потенциалов электродной пары, которая является сигналом детектора [17, 18, 20–23].

Все известные локальные воздействия, влияющие на сигнал детектора (температура, давление, электрическое поле и т.п.), должны быть технически или математически исключены, что представляет весьма трудную задачу.

В предшествующих исследованиях было проведено несколько длительных экспериментов [17–23, 25–29]. В результате выявлены макроскопические нелокальные корреляции между различными детекторами, разнесенными на расстояния до 40 км, а также корреляции между ними и некоторыми крупномасштабными астрофизическими и геофизическими диссипативными процессами с большой случайной компонентой. Нелокальная природа корреляций была доказана нарушением неравенства типа Белла. Важнейшим фактом стало детектирование опережающих корреляций и экспериментальное доказательство проявления принципа слабой причинности для случайных процессов.

Математический инструмент для этого доказательства — причинный анализ, который также играет важную роль в теоретическом исследовании проблем квантовой информации [18, 30–32]. Рассматриваемое явление — квантовое, но поскольку имеем дело с классическим выходом измерительных приборов, можно использовать более простой классический причинный анализ. Напомним некоторые его положения [18, 33]. Для любых переменных X и Y можно определить несколько параметров в терминах шенноновских безусловных $S(X)$, $S(Y)$ и условных $S(X|Y)$, $S(Y|X)$ энтропий. Важнейшие из них — функции независимости:

$$i_{Y|X} = \frac{S(Y|X)}{S(Y)}; \quad i_{X|Y} = \frac{S(X|Y)}{S(X)}, \quad 0 \leq i \leq 1.$$

Далее рассмотрим функцию (меру) причинности γ :

$$\gamma = \frac{i_{Y|X}}{i_{X|Y}}, \quad 0 \leq \gamma < \infty.$$

При $\gamma < 1$ можно определить, что X причина, а Y следствие, при $\gamma > 1$ — Y следствие, а X причина. В квазиклассической области, т.е. при положительных условных энтропиях, мера причинности γ и квантовая мера, называемая ходом времени c_2 [18, 30–32], эквивалентны; в настоящей работе предпочитаем использовать меру γ вследствие ее простоты. В терминах меры γ принцип классической причинности формулируется следующим образом:

$$\gamma < 1 \Rightarrow \tau > 0; \quad \gamma > 1 \Rightarrow \tau < 0; \quad \gamma \rightarrow 1 \Rightarrow \tau \rightarrow 0, \quad (2)$$

где τ — сдвиг времени переменной Y относительно переменной X .

На теоретических и экспериментальных примерах было показано, что такой формальный подход к причинности не противоречит ее интуитивному пониманию [33–37]. Только в случае нелокальных корреляций можно наблюдать нарушение принципа (2). В предыдущих экспериментах нелокальная обратновременная причинность дала даже возможность успешного прогноза крупномасштабных гелиогеофизических процессов [17, 18, 21–29].

Эксперимент. В 2012 г. был начат новый эксперимент на базе Байкальской глубоководной нейтринной обсерватории ИЯИ РАН. Байкал — глубочайшее озеро в мире и его водный слой представляет хорошую защиту от классических локальных воздействий. В частности, уже на глубине нескольких десятков метров естественное термостатирование оказывается лучше достижимого в обычных лабораторных условиях.

Цель эксперимента — исследование нелокальных корреляций между детекторами на различных горизонтах и удаленного на 4200 км лабораторного детектора в Троицке, а также корреляций сигналов детекторов с глобальными и региональными процессами-источниками.

Схема байкальской глубоководной установки приведена на рис. 1. Глубина места 1367 м. Нижний детектор расположен на глубине 1216 м, верхний — на глубине 52 м. Детекторы представляют собой пару высококачественных AgCl-Ag-электродов ХД-5.519.00 с малым (несколько сантиметров) расстоянием между контактными окнами. Электроды были изначально разработаны для высокоточных измерений слабых электрических полей в океане и являются лучшими в мире по нечувствительности собственных потенциалов к параметрам окружающей среды.

Сигналы измеряются и записываются в блоке электроники, расположенном на глубине 22 м. Дискретность измерений 10 с. Калибровка и контроль нуля выполняются автоматически ежедневно. Относительная погрешность измерений не более 0,01 %. Кроме того, блок электроники включает в себя датчики температуры и трех компонент ускорения. Установка фиксируется тяжелым якорем на дне и притопленным бумом на глубине 15 м.

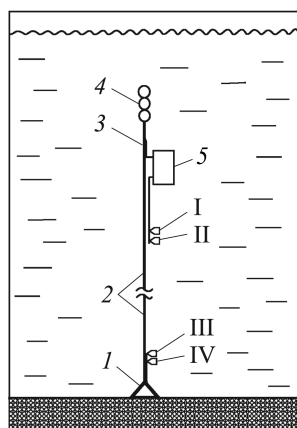


Рис. 1. Схема байкальской глубоководной установки:

I, II — верхние электродные детекторы; III, IV — нижние электродные детекторы; 1 — якорь; 2 — кабель-трос; 3 — буйреп; 4 — буй; 5 — блок электроники, датчики термометра и акселерометра

Установка рассчитана на автономную работу в течение года. Она была развернута в работу со льда в марте 2012 г., в марте 2013 г. поднята на лед для считывания данных и смены источников питания, затем снова погружена на следующий годовой цикл.

Наиболее сильные макроскопические нелокальные корреляции наблюдаются на крайне низких частотах, т.е. период несколько месяцев. Поэтому планируемая длительность эксперимента несколько лет.

Результаты первой годовой серии. С классической точки зрения сигналы детекторов должны быть некоррелированными случайными шумами. Однако это не так. Нормализованные амплитудные спектры нижнего (U_b) и верхнего (U_t) детекторов, а также далеко удаленного лабораторного детектора (U_l) приведены на рис. 2. Диапазон периодов 10...220 сут. На наиболее длинных периодах спектры подобны. Наблюдается полугодовая вариация и солнечная перемежающаяся (intermittent) вариация с периодом около 100 сут. [38]. Чем длиннее период, тем лучше подобие спектров. Также спектр детектора U_b более точно соответствует спектру верхнего детектора U_t , чем удаленного детектора U_l .

Для причинного анализа использованы данные с низкочастотной фильтрацией (на периодах $T > 77$ сут.). Здесь и далее относительная ошибка причинности γ и функции независимости $i_{X|Y}$ оценена как не превышающая 10%. Результаты причинного анализа данных с нижнего и верхнего детекторов представлены на рис. 3, а. При $\gamma > 1$ U_t — причина, а U_b — следствие. При $\tau > 0$ причинность не соответствует классическому принципу (2). Это слабая причинность, разрешенная

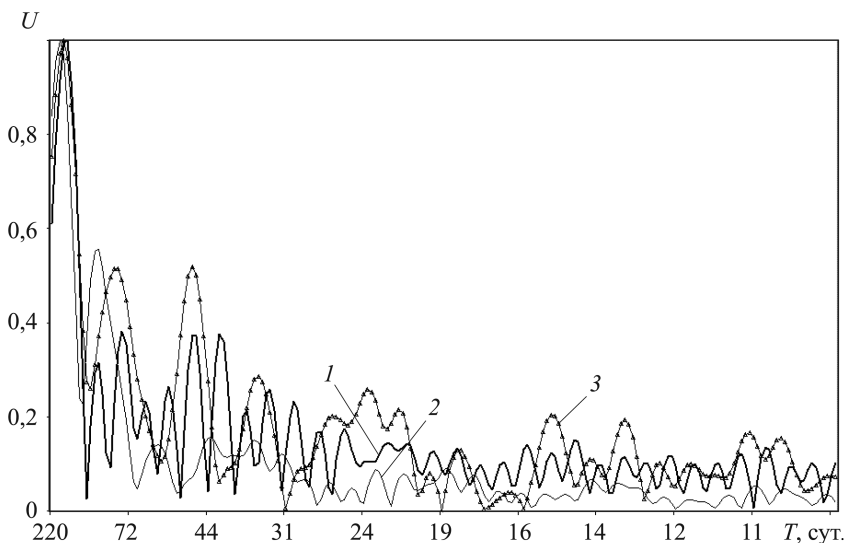


Рис. 2. Нормализованные амплитудные спектры сигналов нижнего U_b (1), верхнего U_t (2) и лабораторного U_l (3) детекторов

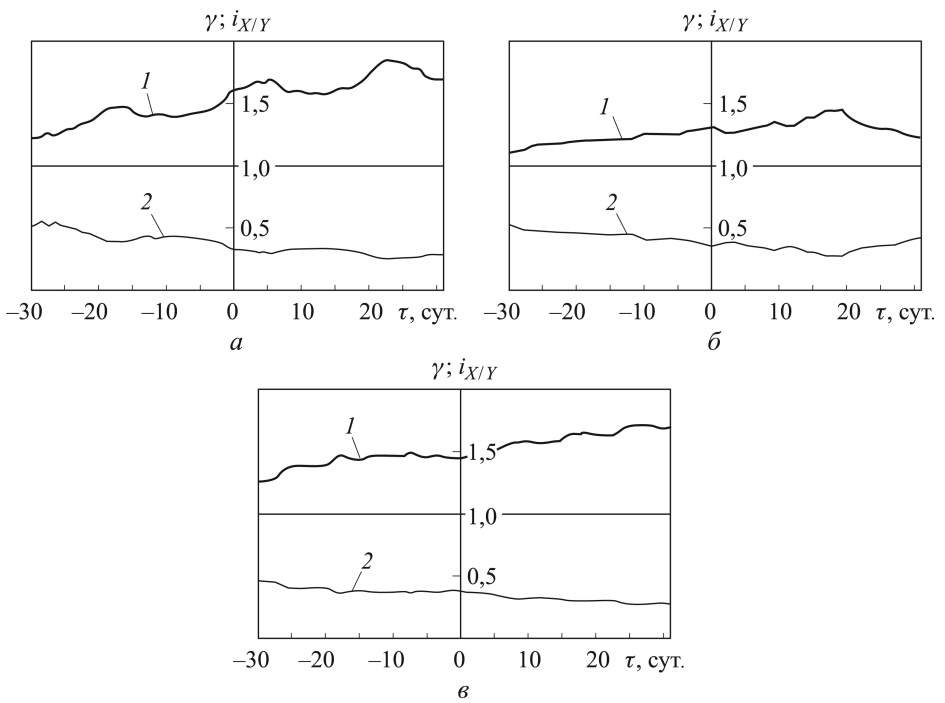


Рис. 3. Результаты причинного анализа данных γ (1) и $i_{X|Y}$ (2):

a — с нижнего $U_b(X)$ и верхнего $U_t(Y)$ детекторов, при $\tau < 0$ соответствует запаздыванию данных с детектора U_b относительно данных с детектора U_t , а при $\tau > 0$ — опережению; *б* — с верхнего $U_t(X)$ и лабораторного $U_l(Y)$ детекторов, $\tau < 0$ соответствует запаздыванию данных с детектора U_t относительно данных с детектора U_l , а при $\tau > 0$ — опережению; *в* — с нижнего $U_b(X)$ и лабораторного $U_l(Y)$ детекторов, при $\tau < 0$ соответствует запаздыванию данных с детектора U_b относительно данных с детектора U_l , а при $\tau > 0$ — опережению

только для квантовых запутанных состояний [1]. Кроме того, существуют три максимума причинности: 1) опережающий; 2) приблизительно синхронный; 3) симметричный запаздывающий. Каждый максимум причинности соответствует независимости $i_{X|Y}$. Наивысший максимум $\gamma = 1,8$ и самый глубокий минимум $i_{X|Y} = 0,25$ находятся при опережении 22 сут. Соответствующая опережающая корреляция $r \approx 0,87$.

Подобная картина с тремя γ -максимумами наблюдалась в предыдущих экспериментах с относительно близкими процессами-источниками [18, 19, 21]. Это находится в соответствии с уравнением (1), определяющим отклики детектора с двумя симметричными временными сдвигами, синхронный отклик может быть результатом интерференции опережающего и запаздывающего сигналов [16]. В сходных экспериментах в случае превалирования дальнего процесса-источника запаздывающий отклик (поэтому и синхронный) был подавлен за счет поглощения и оставался только значимый опережающий спектр [18, 23, 29].

Результаты причинного анализа данных с верхнего и удаленного детекторов представлены на рис. 3, б. При $\gamma > 1$ U_t — причина, а U_l — следствие. Так же, как и в предыдущем случае, эта причинная связь опережающая. Наблюдается единственный максимум $\gamma = 1,4$ при опережении 20 сут. Соответствующий минимум $i_{X|Y} = 0,20$ и максимальная корреляция $r \approx 0,97$ (не показана на рисунке).

Результаты причинного анализа данных с нижнего и удаленного детекторов приведены на рис. 3, в. В этой паре U_l — причина, а U_t — следствие. Эта причинная связь опережающая. Максимум $\gamma = 1,7$ находится при опережении 25 сут. Соответствующий минимум $i_{X|Y} = 0,28$ и максимальная корреляция $r \approx 0,66$.

Следовательно, можно сделать следующий вывод: по данным трех детекторов на разных горизонтах причинная связь их сигналов направлена вниз — от поверхности земли к дну озера. Это вполне естественно для внешних (гелиогеофизических) процессов-источников, эта связь является опережающей, подчиняющейся квантовому принципу слабой причинности в запутанных состояниях.

Как показывает опыт предшествующих экспериментов, корректное рассмотрение корреляции между сигналами детекторов и глобальными гелиогеофизическими процессами требует весьма длительных наблюдений и полученная в байкальском эксперименте годовая серия дает материал лишь для предварительных выводов. Несколько проще обстоит дело с региональными геофизическими процессами-источниками. В первой публикации по результатам байкальского эксперимента исследован процесс случайных вариаций приповерхностной температуры воды на горизонте 22 м [39]. Оказалось, что главный максимум корреляции с детектора U_t ($\gamma = 1,6$; $i_{Y|X} = 0,17$; $r \approx 0,99$) соответствует опережению данных с детектора U_l относительно температуры на 45 сут. Получена демонстрационная серия прогнозов температуры с этим опережением, среднеквадратичная погрешность которых ($0,41$ °C) приемлема для всех практических целей. В настоящей работе исследован другой, сходный диссипативный процесс: случайные вариации скорости поверхностного течения. Вариации скорости были рассчитаны по данным акселерометра исходя из известной геометрии установки и экспериментальной эпюры скорости. При этом гидродинамическое сопротивление практически полностью определяется сопротивлением притопленного буя, поэтому вычисленную скорость можно полагать приповерхностной, средней для слоя глубиной 0...20 м. Точность такого расчета около 20%, но для качественной оценки возможного эффекта этого достаточно.

Спектры (в абсолютных единицах) сигналов двух детекторов и скорости V приведены на рис. 4. Амплитуды детектора U_t в наиболее

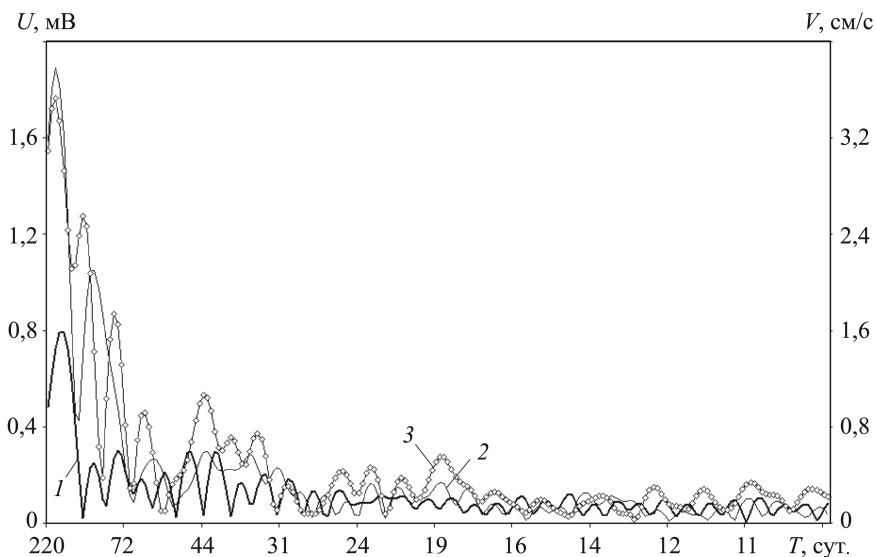
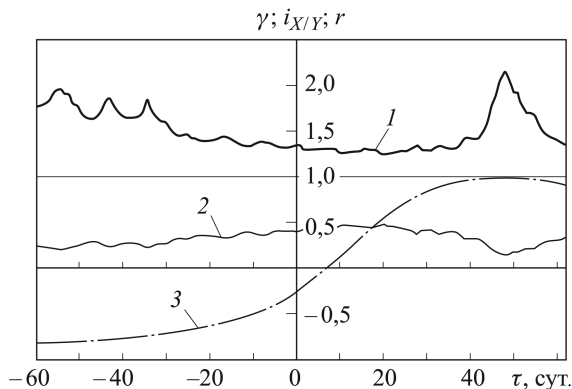


Рис. 4. Амплитудные спектры нижнего U_b (1) и верхнего U_t (2) детекторов и скорости V (3) в слое глубины 0...20 м

важной длиннопериодной части спектра в несколько раз превышают амплитуды детектора U_b . Таким образом, экранирующий эффект водной толщи значителен и для сопоставления с внешними (вышележащими) процессами-источниками целесообразнее использовать сигнал детектора U_t . Наблюдается лучшее сходство спектра скорости V именно со спектром детектора U_t .

Рассмотрим результат причинного анализа данных с детектора U_t и V (рис. 5) с той же низкочастотной фильтрацией $T > 77$ сут. Скорость V — причина, а U_t — следствие, главный максимум $\gamma = 2,1$ при опережении данных с детектора U_t относительно скорости V на 47 сут., соответствующие максимумы $i_{X|Y} = 0,14$, корреляция $r \approx 0,99$. В области запаздывания сигнала U имеется три максимума причинности γ , самый высокий из которых почти симметричен по времени опережающему ($\tau = -45$ сут.), но в 1,2 раза меньше. Соответствующий мини-

Рис. 5. Результаты причинного и корреляционного анализа данных γ (1), $i_{X|Y}$ (2), r (3) с детектора $U_t(X)$ и скорости $V(Y)$ при $\tau < 0$ соответствуют запаздыванию данных с детектора U_t относительно скорости V , при $\tau > 0$ — опережению



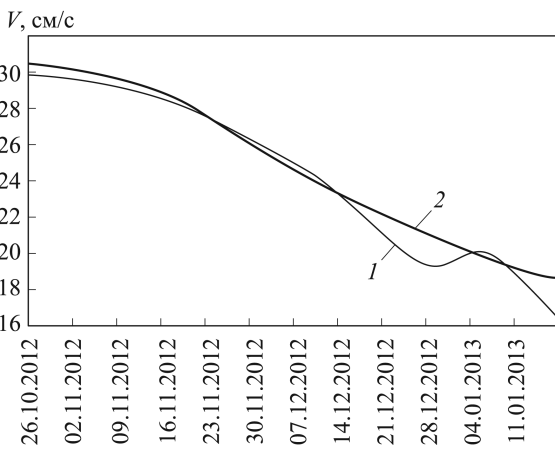


Рис. 6. Прогноз подповерхностного течения скоростью V с опережением 47 сут. (1) в сопоставлении с фактической кривой V (2) при среднеквадратичной ошибке прогноза $\varepsilon = 0,77$ см/с

мум $i_{X|Y}$ — в 1,6 раз менее глубок, чем опережающий, запаздывающая корреляция в 1,2 раза слабее опережающей. Более сильная по всем трем параметрам причинная связь в опережающей области позволяет уверенно считать ее проявлением опережающей макроскопической нелокальной корреляцией. Отметим, что положение времени τ опережающих и запаздывающих экстремумов связи данных с детектора U_t со скоростью приповерхностного течения близки к соответствующим значениям времени τ в вышеупомянутой связи данных с детектора U_t с приповерхностной температурой, но с учетом причинности γ и независимости $i_{X|Y}$ связь данных с детектора U_t со скоростью выражена сильнее. Это естественно, так как вариации скорости и температуры действительно тесно коррелированы, но диссипация энергии течения безусловно выше.

Применим к этим данным прогностический алгоритм, основанный на вычислении текущей (скользящей) регрессии. Этот алгоритм требует довольно длительного обучающего интервала, поэтому прогноз можно было проверить на остающемся относительно коротком отрезке временного ряда. Результат представлен на рис. 6. Прогностическая кривая, показанная на рисунке, получена ежедневным прогнозом с фиксированным опережением $\tau = 47$ сут. Точность прогноза приемлема для практических целей.

Согласно предыдущим исследованиям, важнейший глобальный источник — солнечная активность [18–23, 25–29]. Поскольку опережающая корреляция связана только со случайной компонентой активности источника и эта корреляция за счет меньшего поглощения опережающего поля Уиллера – Фейнмана преобладает над запаздывающей, в целом в спектре сигнала детектора преобладает отклик на нерегулярные процессы, например перемежающиеся колебания. Реакция на мощные, но регулярные изменения, например, обусловленные вращением Солнца (периодичность 27 сут.), как правило, весьма слаба.

Кроме того, спектральные максимумы на периоде вращения Солнца и его гармоник (см. рис. 2), хорошо заметные в спектре лабораторного детектора U_l , подавлены в спектрах подводных детекторов U_t и U_b . Это очевидный результат экранирующего влияния водной толщи, особенно сильного для запаздывающей части поля.

Как и в случае связи с региональными процессами, оптимальным является использование сигнала U_t . В качестве индекса солнечной активности выбран поток рентгеновского излучения XR в диапазоне значений длины волны 0,05... 0,4 нм, измеряемого спутниками GOES. Поток рентгеновского излучения поступает из слоя верхней хромосферы — нижней короны, где происходит наиболее мощный и нерегулярный процесс производства энтропии за счет диссипации магнитозвуковых волн. Конечно, излучение XR — это косвенный и сугубо качественный индекс энтропийного источника. Однако он удобен тем, что рентгеновское излучение полностью поглощается в верхних слоях атмосферы Земли и поэтому никак не может влиять на сигналы наземных, а тем более подводных детекторов.

Амплитудные спектры U_b , U_t , XR приведены на рис. 7. Подобие наблюдается только в самой длиннопериодной части. Главный максимум излучения XR на периоде вращения Солнца практически не имеет отклика в сигналах подводных детекторов. Наибольшим подобием обладают спектры XR и U_t в диапазоне периодов 49... 183 сут. Поэтому для причинного и корреляционного анализа была использована полосовая фильтрация в этом диапазоне значений периода. Результат

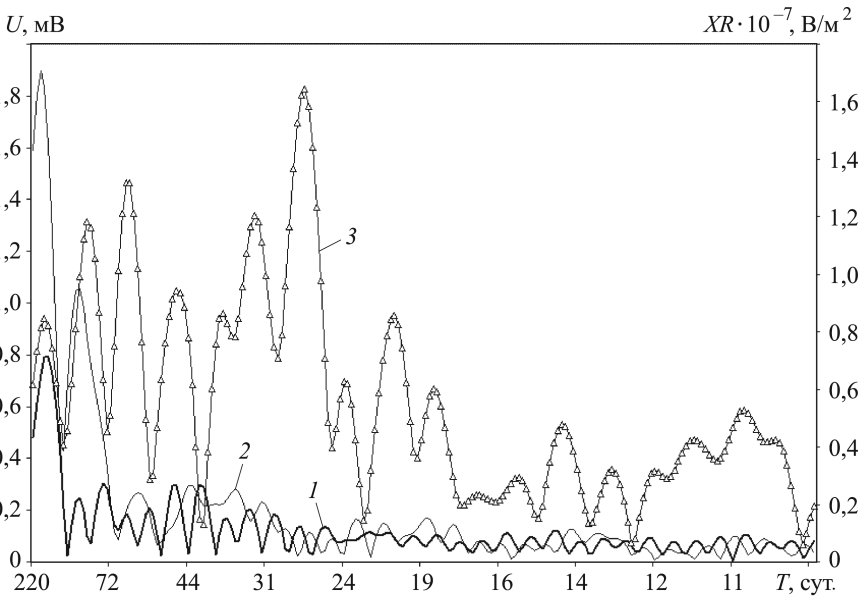


Рис. 7. Амплитудные спектры нижнего U_b (1), верхнего U_t (2) детекторов и солнечной активности XR (3)

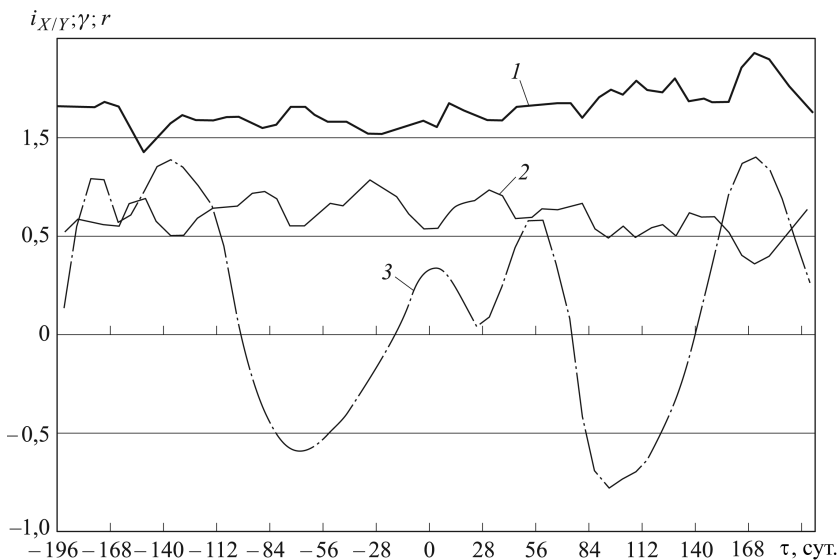


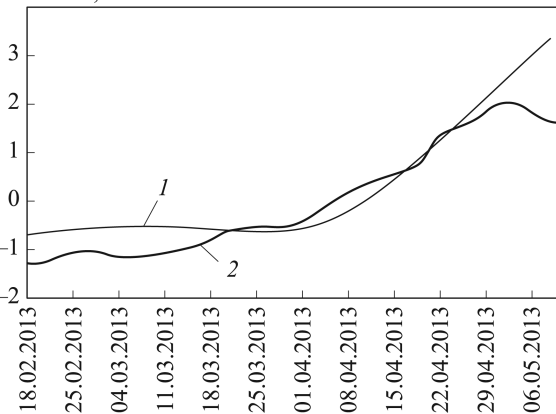
Рис. 8. Результаты причинного и корреляционного анализа данных γ (1), $i_{X|Y}$ (2) и r (3) с детектора $U_t(X)$ и $XR(Y)$ при $\tau < 0$ соответствуют запаздыванию данных с детектора U_t относительно активности XR , при $\tau > 0$ — опережению

анализа представлен на рис. 8. Главный максимум $\gamma = 1,4$ и главный минимум $i_{X|Y} = 0,36$ наблюдаются при опережении 168 сут. Им соответствует максимум корреляции $r \approx 0,90$. Симметричный по времени τ запаздывающий экстремум слабее, он хорошо заметен только у корреляции r и почти подавлен в функции γ . Столь большое время опережения характерно для процессов большого пространственного масштаба, каким является солнечная активность [18, 19, 29].

В приложении к прогнозу случайной компоненты солнечной активности наиболее эффективен ранее разработанный и успешно применявшийся алгоритм, основанный на расчете текущей импульсной переходной характеристики, которая оптимально учитывает сложный характер корреляционной функции [18, 23, 28, 29]. Однако его применение возможно, если длина наблюдений многократно превышает опережение прогноза. В данном случае для демонстрации возможности прогноза, как и в случае прогноза скорости V , будем использовать алгоритм простой скользящей регрессии. Результат представлен на рис. 9. Подобно прогнозу скорости V , он получен путем ежедневного прогностического расчета активности XR с фиксированным опережением 168 сут. Показанная серия демонстрирует достаточную эффективность прогнозов — их среднеквадратическая погрешность в 6 раз меньше размаха изменений активности XR . Отметим, что прогноз на основе нелокальных корреляций касается именно случайной (не детерминированной эволюцией) компоненты прогнозируемой величины. В этом его принципиальное отличие от прочих методов прогнозов,

$XR \cdot 10^{-7}, \text{В/м}^2$

Рис. 9. Прогноз отклонения солнечной активности от средней активности XR с заблаговременностью 168 сут. (1) в сопоставлении с фактической кривой XR (2) при среднеквадратичной ошибке прогноза $\varepsilon = 0,51 \cdot 10^{-7} \text{ В/м}^2$



где случайная компонента является шумом, ухудшающим качество по мере роста опережения. Поэтому прогноз на основе нелокальных корреляций — это не альтернатива, а дополнение к классическим методам.

Заключение. Начат длительный байкальский глубоководный эксперимент по изучению макроскопической запутанности и связанным с ней явлением опережающих нелокальных корреляций. Эксперимент включает в себя измерения тремя детекторами нелокальных корреляций на глубинах 52 и 1216 м в озере Байкал и в удаленной на 4200 км лаборатории в Троицке. Изучается корреляция между сигналами детекторов и между сигналами и крупномасштабными геофизическими и астрофизическими источниками.

Первый результат — установление опережающей причинной связи сигналов детекторов, что представляет наиболее своеобразную черту макроскопической запутанности и проявление квантового принципа слабой причинности.

Второй результат — выявление опережающего отклика сигналов детекторов на некоторые региональные (вариации приповерхностной температуры и скорости течения) и глобальные (вариации потока рентгеновского излучения Солнца) случайные диссипативные процессы. Продемонстрирована возможность прогностического использования этого явления. Поскольку изучаемые корреляции возникают на экстремально низких частотах, следует ожидать, что по мере продолжения наблюдений достоверность результатов будет возрастать, и их интерпретацию можно будет поднять на более строгий количественный уровень.

Работа выполнена при поддержке ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009–2013 гг., НОЦ “Байкал” и РФФИ (гранты 12-05-00001, 12-05-98009, 12-02-10000).

Авторы благодарят В.Л. Зурбанова, Р.Р. Миргазова, В.Б. Бузина и А.В. Новыша за разработку аппаратуры и развертывание глубоководного эксперимента.

1. *Cramer J.G.* Generalized absorber theory and Einstein – Podolsky – Rosen paradox // *Phys. Rev D.* 1980. Vol. 22. P. 362–376.
2. *Laforest M., Baugh J., Laflamme R.* Time-reversal formalism applied to bipartite entanglement: theoretical and experimental exploration // *Phys. Rev. A.* Vol. 73. P. 032323.
3. *Lloyd S., Maccone L., Garcia-Patron R., Giovannetti V., Shikano Y., Pirandola S., Rozema L.A., Darabi A., Soudagar Y., Shalm L.K., Steinberg A.M.* Closed timelike curves via post-selection: theory and experimental demonstration // *Phys. Rev. Lett.* 2011. Vol. 106. P. 040403.
4. *Ma X.-S., Zotter S., Kofler J., Ursin R., Jennewien T., Brukner I., Zeilinger A.* Experimental delayed-choice entanglement swapping // *Nature Physics.* 2012. Vol. 8. P. 479–485.
5. *Megidish E., Halevy A., Shacham T., Dvir T., Dovrat L., Eisenberg H.S.* Entanglement between photons that have never coexist // *Phys. Rev. Lett.* 2013. Vol. 110. P. 210403.
6. *Plenio M.B., Huelga S.F., Beige A., Knight P.L.* Entangling two qubits by dissipation // *Phys. Rev. A.* 1999. Vol. 59. P. 2468–2475.
7. *Баушаров А.М.* Декогеренция и перепутывание при радиационном распаде двух-атомной системы // *ЖЭТФ.* 2002. Т. 59. Вып. 6. С. 1249–1260.
8. *Plenio M.B., Huelga S.F.* Entangled light from white noise // *Phys. Rev. Lett.* 2002. Vol. 88. P. 197901.
9. *Kim M.S., Lee J., Ahn D., Knight P.L.* Entanglement induced by a single-mode heat environment // *Phys. Rev. A.* 2002. Vol. 65. P. 040101.
10. *Braun D.* Creation of entanglement by interaction with a common heat bath // *Phys. Rev. Lett.* 2002. Vol. 89. P. 277901.
11. *Jakobczyk L.* Entangling two qubits by dissipation // *J. Phys. A.* 2002. Vol. 35. P. 6383–6392.
12. *Benatti F., Floreanini R., Piani M.* Environment induced entanglement in Markovian dissipative dynamics // *Phys. Rev. Lett.* 2003. Vol. 91. P. 070402.
13. *Choi T., Lee H.J.* Quantum entanglement induced by dissipation // *Phys. Rev. A.* 2007. Vol. 76. P. 012308.
14. *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.
15. *Козырев Н.А., Насонов В.В.* О некоторых свойствах времени, обнаруженных астрономическими наблюдениями // *Проблемы исследования Вселенной.* 1980. Вып. 9. С. 76–84.
16. *Cramer J.G.* The transactional interpretation of Quantum Mechanics // *Rev. Mod. Phys.* Vol. 58. P. 647–688.
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. Vol. 3. P. 275–294.
18. *Korotaev S.M.* Causality and reversibility in irreversible time. Scientific Research Publishing, Inc., USA, 2011. 130 p.
19. *Korotaev S.M., Serdyuk V.O.* The forecast of fluctuating large-scale natural processes and macroscopic correlations effect // *Int. J. of Computing Anticipatory Systems.* 2008. Vol. 20. P. 31–46.
20. *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 // *Phys. Chem. Earth A.* 1999. 24. P. 735–740.
21. *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.

22. *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.
23. *Korotaev S.M.* Experimental study of advanced correlation of some geophysical and astrophysical processes // Int. J. of Computing Anticipatory Systems. 2006. Vol. 17. P. 61–76.
24. *Hoyle F., Narlikar J.V.* Cosmology and action-at-a-distance electrodynamics // Rev. Mod. Phys. 1995. Vol. 67. No. 1. P. 113–156.
25. *Korotaev S.M., Serdyuk V.O., Nalivaiko V.I., Novysh A.V., Gaidash S.P., Gorokhov Yu.V., Pulinets S.A., Kanonidi Kh.D.* Experimental estimation of macroscopic nonlocality effect in solar and geomagnetic activity // Phys. of Wave Phenomena. 2003. Vol. 11. No. 1. P. 46–55.
26. *Korotaev S.M., Serdyuk V.O., Gorohov J.V., Pulinets S.A., Machinin V.A.* Forecasting effect of macroscopic nonlocality // Frontier Perspectives. 2004. Vol. 13. No. 1. P. 41–45.
27. *Коротаев С.М., Морозов А.Н., Сердюк В.О., Горохов Ю.В., Филиппов Б.П., Мачинин В.А.* Экспериментальное исследование опережающих нелокальных корреляций процесса солнечной активности // Известия высших учебных заведений, Физика. 2007. № 4. С. 26–33.
28. *Коротаев С.М., Сердюк В.О., Горохов Ю.В.* Прогноз геомагнитной и солнечной активности на основе нелокальных корреляций. Доклады Академии наук. 2007. Т. 415. № 6. С. 814–817.
29. *Korotaev S.M., Serdyuk V.O., Gorohov J.V.* Forecast of solar and geomagnetic activity on the macroscopic nonlocality effect // Hadronic Journal. 2007. Vol. 30. No. 1. P. 39–56.
30. *Korotaev S.M., Kiktenko E.O.* Causal analysis of the quantum states // Search for Fundamental Theory. AIP Proceedings. 2010. Vol. 1316. P. 295–331.
31. *Kiktenko E.O., Korotaev S.M.* Causal analysis of asymmetric entangled states // Physics Letters A. 2012. Vol. 376. P. 820–823.
32. *Korotaev S.M., Kiktenko E.O.* Causality and decoherence in the asymmetric states // Physica Scripta. 2012. Vol. 85. P. 055006.
33. *Коротаев С.М.* О возможности причинного анализа геофизических процессов // Геомагнетизм и аэрономия. 1992. Т. 32. № 1. С. 27–33.
34. *Коротаев С.М., Шабелянский С.В., Сердюк В.О.* Обобщенный причинный анализ и его применение для изучения электромагнитного поля в океане // Известия АН. Физика Земли. 1992. № 6. С. 77–66.
35. *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.
36. *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.
37. *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.
38. *Lean J.L., Brueckner G.E.* Intermediate-term solar periodicities: 100-500 days // Astrophys. J. 1989. Vol. 337. P. 568–578.
39. *Korotaev S.M., Budnev N.M., Serdyuk V.O., Gorohov J.V., Kiktenko E.O., Zurbanov V.L., Mirgazov R.R., Buzin V.B., Novysh A.V.* Preliminary results of the Baikal experiment on observations of macroscopic nonlocal correlations in reverse time // Physical Interpretations of Relativity Theory. NY.: Reuters, 2013. P. 198–208.

REFERENCES

- [1] Cramer J.G. Generalized absorber theory and Einstein–Podolsky–Rosen paradox. *Phys. Rev. D*, 1980, vol. 22, pp. 362–376.
- [2] Laforest M., Baugh J., Laflamme R. Time-reversal formalism applied to bipartite entanglement: theoretical and experimental exploration. *Phys. Rev. A*, vol. 73, P. 032323.
- [3] Lloyd S., Maccone L., Garcia-Patron R., Giovannetti V., Shikano Y., Pirandola S., Rozema L.A., Darabi A., Soudagar Y., Shalm L.K., Steinberg A.M. Closed timelike curves via post-selection: theory and experimental demonstration. *Phys. Rev. Lett.*, 2011, vol. 106, P. 040403.
- [4] Ma X.-S., Zotter S., Kofler J., Ursin R., Jennewien T., Brukner I., Zeilinger A. Experimental delayed-choice entanglement swapping. *Nature Physics*, 2012, vol. 8, pp. 479–485.
- [5] Megidish E., Halevy A., Shacham T., Dvir T., Dovrat L., Eisenberg H.S. Entanglement Between Photons that have Never Coexist. *Phys. Rev. Lett.*, 2013, vol. 110, P. 210403.
- [6] Plenio M.B., Huelga S.F., Beige A., Knight P.L. Entangling two qubits by dissipation. *Phys. Rev. A*, 1999, vol. 59, pp. 2468–2475.
- [7] Basharov A.M. // *ZhETF* [J. Exp. Theor. Phys.], 2002, vol. 59, no. 6, pp. 1249–1260 (in Russ.).
- [8] Plenio M.B., Huelga S.F. Entangled light from white noise. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, vol. 88, p. 197901.
- [9] Kim M.S., Lee J., Ahn D., Knight P.L. Entanglement induced by a single-mode heat environment. *Phys. Rev. A*, 2002, vol. 65, P. 040101.
- [10] Braun D. Creation of Entanglement by Interaction with a Common Heat Bath. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, vol. 89, P. 277901.
- [11] Jakobczyk L. Entangling two qubits by dissipation. *J. Phys. A*, 2002, vol. 35, P. 6383–6392.
- [12] Benatti F., Floreanini R., Piani M. Environment induced entanglement in Markovian dissipative dynamics. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, vol. 91, P. 070402.
- [13] Choi T., Lee H.J. Quantum entanglement induced by dissipation. *Phys. Rev. A*, 2007, vol. 76, P. 012308.
- [14] Kozyrev N.A., Nasonov V.V. *Problemy issledovaniya Vselennoy* [Problems of research universe], 1978, no. 7, pp. 168–179 (in Russ.).
- [15] Kozyrev N.A., Nasonov V.V. *Problemy issledovaniya Vselennoy* [Problems of research universe], 1980, no. 9, pp. 76–84 (in Russ.).
- [16] Cramer J.G. The transactional interpretation of quantum mechanics. *Rev. Mod. Phys.*, vol. 58, pp. 647–688.
- [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, vol. 3, pp. 275–294.
- [18] Korotaev S.M. Causality and Reversibility in Irreversible Time. Scientific Research Publishing, Inc., USA, 2011. 130 p.
- [19] Korotaev S.M., Serdyuk V.O. The forecast of fluctuating large-scale natural processes and macroscopic correlations effect. *Int. J. of Computing Anticipatory Systems*, 2008, vol. 20, pp. 31–46.
- [20] 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. *Phys. Chem. Earth A*, 1999, vol. 24, pp. 735–740.
- [21] Korotaev S.M., Serdyuk V.O., Sorokin M.O. Macroscopic manifestation of non-locality in the geomagnetic and solar-ionospheric processes. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy], 2000, vol. 40, no. 3, pp. 56–64 (in Russ.).

- [22] Korotaev S.M., Morozov A.N., Serdyuk V.O., Sorokin M.O. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved., Fizika*. [Proc. Univ., Physics], 2002, no. 5, pp. 3–14.
- [23] Korotaev S.M. Experimental study of advanced correlation of some geophysical and astrophysical processes. *Int. J. of Computing Anticipatory Systems*, 2006, vol. 17, pp. 61–76.
- [24] Hoyle F., Narlikar J.V. Cosmology and action-at-a-distance electrodynamics. *Rev. Mod. Phys.*, 1995, vol. 67, no. 1, pp. 113–156.
- [25] Korotaev S.M., Serdyuk V.O., Nalivaiko V.I., Novysh A.V., Gaidash S.P., Gorokhov Yu.V., Pulinets S.A., Kanonidi Kh.D. Experimental estimation of macroscopic nonlocality effect in solar and geomagnetic activity. *Phys. of Wave Phenomena*, 2003, vol. 11, no. 1, pp. 46–55.
- [26] Korotaev S.M., Serdyuk V.O., Gorohov J.V., Pulinets S.A., Machinin V.A. Forecasting affect of macroscopic nonlocality. *Frontier Perspectives*, 2004, vol. 13, no. 1, pp. 41–45.
- [27] Korotaev S.M., Morozov A.N., Serdyuk V.O., Gorokhov Yu.V., Filippov B.P., Machinin V.A. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved., Fizika*. [Proc. Univ., Physics], 2007, no. 4, pp. 26–33 (in Russ.).
- [28] Korotaev S.M., Serdyuk V.O., Gorokhov Yu.V. Forecast of geomagnetic and solar activity based on nonlocal correlations. *Dokl. Akad. Nauk* [Proc. Acad. Sci.], 2007, vol. 415, no. 6, pp. 814–817 (in Russ.).
- [29] Korotaev S.M., Serdyuk V.O., Gorohov J.V. Forecast of solar and geomagnetic activity on the macroscopic nonlocality effect. *Hadronic Journal.*, 2007, vol. 30, no. 1, pp. 39–56.
- [30] Korotaev S.M., Kiktenko E.O. Causal analysis of the quantum states. *Search for Fundamental Theory. AIP Proceedings*, 2010, vol. 1316, pp. 295–331.
- [31] Kiktenko E.O., Korotaev S.M. Causal analysis of asymmetric entangled states. *Physics Letters A.*, 2012, vol. 376, pp. 820–823.
- [32] Korotaev S.M., Kiktenko E.O. Causality and decoherence in the asymmetric states. *Physica Scripta*, 2012, vol. 85. P. 055006.
- [33] Korotaev S.M. On the possibility of a causal analysis of geophysical processes. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy], 1992, vol. 32, no. 1, pp. 27–33 (in Russ.).
- [34] Korotaev S.M., Shabelyansky S.V., Serdyuk V.O. Generalized causal ana- Lease and its application to the study of the electromagnetic field in the sea. *Izv. RAN, Fiz.* [Proc. Russ. Acad. Sci., Phys.], 1992, no. 6, pp. 77–66 (in Russ.).
- [35] Khachai O.A., Korotaev S.M., Trojans A.K. The results of application the causal analysis for borehole data processing of seismic acoustic and electromagnetic emission. *Volcanology and Seismology* [Volcanology and Seismology], 1992, No. 3, pp. 92–100.
- [36] Korotaev S.M., Khachay O.A., Shabelyanskiy S.V. Causal analysis process horizontal diffusion of information of the electromagnetic field in the ocean. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy], 1993, vol. 33, no. 2, pp. 128–133 (in Russ.).
- [37] Korotaev S.M. The role of the various definitions of entropy in causal analysis geophysical processes and their application to electromagnetic induction in sea currents. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy], 1995, vol. 35, no. 3, pp. 116–125 (in Russ.).
- [38] Lean J.L., Brueckner G.E. Intermediate-term solar periodicities: 100-500 days. *Astrophys. J.*, 1989, vol. 337, pp. 568–578.
- [39] Korotaev S.M., Budnev N.M., Serdyuk V.O., Gorohov J.V., Kiktenko E.O., Zurbanov V.L., Mirgazov R.R., Buzin V.B., Novysh A.V. Preliminary results of the Baikal experiment on observations of macroscopic nonlocal correlations in reverse time. *Physical Interpretations of Relativity Theory*, N.Y., Reuters, 2013, pp. 198–208.

Статья поступила в редакцию 30.10.2013

Сергей Маратович Коротаев — д-р физ.-мат. наук, заведующий лабораторией ЦГЭМИ ИФЗ РАН, профессор кафедры “Физика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 210 научных работ в области физических приложений теории информации, квантовой механики, классической электродинамики и геофизики.

ЦГЭМИ ИФЗ РАН, Российская Федерация, 142190, Москва, Троицк, а/я 30.

S.M. Korotaev — Dr. Sci. (Phys.–Math.), head of laboratory of the Geoelectromagnetic Research Centre of Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, professor of “Physics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 210 publications in the field of physical applications of information theory, quantum mechanics, classical electrodynamics, and geophysics.

Geoelectromagnetic Research Centre of Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, P.O.Box 30, Troitsk, Moscow, 142190 Russian Federation.

Николай Михайлович Буднев — д-р физ.-мат. наук, директор НИИПФ ИГУ, декан физического факультета ИГУ, заведующий лабораторией астрофизики элементарных частиц и гамма-астрономии НИИПФ ИГУ, профессор кафедры “Радиоэлектроника” ИГУ. Автор около 250 научных работ в области физики высоких энергий, астрофизики элементарных частиц геофизики.

НИИПФ ИГУ, Российская Федерация, 664003, Иркутск, бульвар Гагарина, д. 20.

N.M. Budnev — Dr. Sci. (Phys.–Math.), director of the Research Institute of Applied Physics of the Irkutsk State University, dean of Faculty of Physics of the Irkutsk State University, head of laboratory of astrophysics of particles and gamma-astronomy of the Research Institute of Applied Physics of the Irkutsk State University, professor of “Radio Electronics” department of the Irkutsk State University. Author of about 250 publications in the field of high energy physics, astrophysics of particles and geophysics.

Research Institute of Applied Physics of the Irkutsk State University, bul’var Gagarina 20, Irkutsk, 664003 Russian Federation.

Вячеслав Олегович Сердюк — старший научный сотрудник ЦГЭМИ ИФЗ РАН. Автор 60 научных работ в области физических приложений теории информации, электродинамики и геофизики.

ЦГЭМИ ИФЗ РАН, Российская Федерация, 142190, Москва, Троицк, а/я 30.

V.O. Serdyuk — senior researcher of the of the Geoelectromagnetic Research Centre of Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences. Author of 60 publications in the field of physical applications of information theory, electrodynamics, and geophysics.

Geoelectromagnetic Research Centre of Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, P.O.Box 30, Troitsk, Moscow, 142190 Russian Federation.

Юрий Васильевич Горохов — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник ИЗМИРАН. Автор 70 научных работ в области физики необратимых процессов, радиофизики и геофизики.

ИЗМИРАН, Российская Федерация, 142190, Москва, Троицк, Калужское ш., д. 4.

Yu.V. Gorokhov — Cand. Sci. (Phys.–Math.), senior researcher of the Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences. Author of 70 publications in the field of physics of irreversible processes, radio physics, and geophysics.

Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences, Kaluzhskoe shosse 4, Troitsk, Moscow, 142190 Russian Federation.

Евгений Олегович Киктенко — аспирант кафедры “Физика” МГТУ им. Н.Э. Баумана, ведущий инженер ЦГЭМИ ИФЗ РАН. Автор 18 научных работ в области физики квантовой информации и геофизики.

ЦГЭМИ ИФЗ РАН, Российская Федерация, 142190, Москва, Троицк, а/я 30.

E.O. Kiktenko — post-graduate of “Physics” department of the Bauman Moscow State Technical University, leading engineer of the Geoelectromagnetic Research Centre of Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences. Author of 18 publications in the field of physics of quantum information and geophysics.

Geoelectromagnetic Research Centre of Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, P.O.Box 30, Troitsk, Moscow, 142190 Russian Federation.

Андрей Иванович Панфилов — инженер-исследователь ИЯИ РАН. Автор около 100 научных работ в области физики элементарных частиц, астрофизики, глубоководной инженерии, гидрофизики и геофизики.

ИЯИ РАН, Российская Федерация, 142190, Москва, Троицк, ул. Физическая, вл. 27.

A.I. Panfilov — engineer-researcher of the Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences. Author of about 100 publications in the field of physics of particles, astrophysics, deep-water engineering, hydrophysics, and geophysics.

Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences, Troitsk, Moscow, 142190 Russian Federation.