

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛОКАЛЬНОСТИ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ДИССИПАТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ

© КОРОТАЕВ С.М., СЕРДЮК В.О., СОРОКИН М.О., МАЧИНИН В.А.

ИНСТИТУТ ГЕОЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАН,
142092, ТРОИЦК, МОСКОВСКАЯ ОБЛ., А/Я 30

1. ВВЕДЕНИЕ

Макроскопическая нелокальность представляет новый физический эффект, заключающийся в корреляции диссипативных процессов без посредства локальных носителей взаимодействия. Идея о наличии такого рода корреляции и первые экспериментальные доказательства ее существования были впервые предложены Н.А. Козыревым [1]. Полная теория эффекта пока не построена, но представляется правдоподобным, что в основе лежит явление квантовой нелокальности, которое при некоторых условиях сохраняется в сильном макропределе [2]. В свою очередь, интерпретация квантовой нелокальности как эффекта абсорбционной электродинамики Уилера-Фейнмана [3] в ее современной трактовке [4] позволяет показать, что макроскопическая нелокальность проявляет себя как связь производств энтропии в изолированных, в обычном смысле, диссипативных процессах [5, 6]. Это дало возможность целенаправленно поставить эксперименты по изучению эффекта нелокальности некоторых естественных диссипативных процессов и выполнить их на современном уровне строгости [5-9]. В качестве процессов-источников в этих экспериментах изучались процессы геомагнитной, ионосферной, синоптической и солнечной активности, для которых были получены количественные характеристики нелокального воздействия на пробные процессы. Была также показана принципиальная независимость результатов от конкретного типа пробного процесса (с точностью до удачности технической реализации детектора) [5, 6, 8].

Учитывая новизну проблемы, существенным недостатком экспериментов [5-9] следует признать неизбежную модельную зависимость интерпретации результатов, возникающую при задании параметров источников – производства энтропии и ее геометрического распределения. Так, из перечисленных выше четырех типов естественных диссипативных процессов, только для процесса генерации геомагнитных вариаций удалось достаточно легко (хотя и приближенно) оценить эти параметры. С точки зрения логики эксперимента, для достаточно уверенного исследования естественных процессов следовало бы иметь результаты измерения эффекта макроскопической нелокальности с хорошо контролируруемыми искусственными источниками. Хотя эксперименты с искусственными источниками ранее выполнялись [1,10-13], уровень их стро-

гости был весьма низким, а кроме того сама задача в то время формулировалась на качественном уровне, и поэтому производство энтропии в источнике количественно не контролировалось. Настоящая работа имеет целью восполнение этого пробела – измерение эффекта нелокальности искусственных диссипативных процессов в достаточно строгой постановке.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Задачей эксперимента является измерение эффекта нелокального воздействия источника на сигнал детектора. Источник – диссипативный процесс, находящийся на известном расстоянии от детектора и обладающий известным производством энтропии. Детектор – устройство, включающее пробный процесс известной природы, т.е. процесс, для которого наблюдаемая величина (сигнал) известным образом связана с производством энтропии. Детектор должен быть экранирован от всех известных из его теории видов локального воздействия. Если полное экранирование невозможно, остаточное воздействие должно контролироваться.

Исходя из опыта [5-9] нами избран наиболее удачный из испытанных детектор на основе процесса вариаций собственных потенциалов слабополяризующихся электродов в электролите. Конструкция детектора исключает все виды локального воздействия на собственные потенциалы, кроме одного, который можно существенно ослабить, но, в принципе, нельзя устранить до конца – температурных вариаций. Последнее обстоятельство ограничивает энергию процессов-источников сверху, поскольку все диссипативные процессы сопровождаются температурным эффектом. С другой стороны, эта энергия ограничена снизу уровнем (нелокальных) шумов, создаваемых диссипативными процессами, неизбежно имеющими место в самой измерительной аппаратуре.

В этих рамках нелокальное воздействие искусственного источника на пробный процесс может, однако, оказаться сравнимым с нелокальным воздействием геофизических процессов [5]. Влияние последних исключается применением дифференциальной схемы измерений. Используется два разнесенных детектора, процесс-источник размещается вблизи одного из них на расстоянии малом по сравнению с разнесом. Измеряется разностный сигнал детекторов.

Оптимальная энергия источника находится вблизи верхней границы вышеуказанного диапазона. Поэтому требуется высокоэффективная термоизоляция детекторов и высокоточный контроль остаточной разности их внутренних температур.

Следует отметить одно принципиальное ограничение экспериментов с искусственными источниками. Для любых искусственных источников должен выполняться принцип не только слабой, но и сильной причинности [3], по-

этому для них опережающая часть сигнала ненаблюдаема. Для естественных источников опережающая часть наблюдается, более того, благодаря меньшей эффективности ее экранирования промежуточными средами [4], она существенно преобладает над запаздывающей. Практически, только для нее удалось оценить сечение взаимодействия [5-7, 9]. Поэтому прямое количественное сравнение этих двух типов экспериментов пока затруднительно. Основная цель экспериментов с искусственными источниками – проверка универсальности механизма макроскопического нелокального взаимодействия и изучение его статистических свойств.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Блок-схема установки приведена на рис.1. Процесс-источник S размещается на расстоянии $r=0,5$ м от детектора, измеряющего разность собственных потенциалов U_1 , внутри которого имеется также датчик внутренней температуры T_1 . Полностью идентичный детектор U_2 (T_2) размещен на фиксированном расстоянии $l=4$ м. Далее сигналы проходят через схемы вычитания U_1-U_2 , T_1-T_2 и после усиления прецизионными усилителями A подаются на регистраторы ΔU , ΔT .

Детектор нелокального взаимодействия основан на связи энтропии двойного электрического слоя с собственной разностью потенциалов электродной пары. Полная теория детектора приведена в [5]. Связь изменения энтропии двойного слоя ΔS_d и изменения разности потенциалов ΔU в хорошем приближении представима формулой:

$$\Delta S_d = - \frac{|q|\Delta U}{\sqrt{6kTg}}, \quad (1)$$

где q - заряд иона жидкой фазы двойного слоя, k - постоянная Больцмана, g - эффективность детектора (в среднем равная коэффициенту вариации U). При использовании дифференциальной установки благодаря квадратичному закону геометрического затухания в уравнении макроскопической нелокальности [5-7, 9] и при условии $r \ll l$ в (1) под ΔU подразумевается изменение разности сигнала U_1-U_2 .

За основу взят электродный детектор, использовавшийся в экспериментах [5-9]. В качестве электродов в нем используются морские графитомарганцевые электроды типа "ИЗМИРАН-Севморгео". Этот тип отличается малым температурным и барическим коэффициентом, отсутствием зависимости потенциала от концентрации ионов (Na^+ , Cl^-) и предельно малым поляризационным гистерезисом [14]. Электроды до начала эксперимента 12 лет вы-

держивались в поднасыщенном растворе $NaCl$, и этот же раствор использовался в детекторах в качестве электролита. Это позволило исключить влияние эффекта старения и переходных диффузионных процессов. Хорошо проводящий электролит играет также роль экрана от внешнего электрического поля. Отсутствие влияния на детектор и измерительную схему магнитного поля в диапазоне $0 \div 1$ Гц было проверено в специальном эксперименте [5, 9].

Схема устройства детектора показана на рис.3. Электроды помещаются изолирующими корпусами вплотную друг к другу в стеклянном сосуде с электролитом, так что расстояние между контактными окнами составляет всего 1,5 см. Минимальная межэлектродная база, однородность электролита и материал сосуда исключают эффект внутреннего электрического поля. Сосуд жестко герметизирован, так что исключается как испарение, так и передача колебаний атмосферного давления на электроды. Сосуд помещается в дьюар, окруженный снаружи дополнительной изоляцией. Последняя, по сравнению с экспериментами [5-9] была значительно усилена – в качестве нее использован капролоновый глубоководный контейнер с толщиной стенок 20 мм. Выполненное, таким образом, пассивное термостатирование снижает амплитуду температурных вариаций на характерном периоде эксперимента (несколько часов) от величины порядка $1K$ снаружи до $0,001K$ внутри детектора. Для контроля остаточных вариаций температуры между внутренней стенкой дьюара и сосудом с электродами помещен термодатчик, позволяющий непрерывно измерять их с реализованной точностью до $0,0009K$. Величина ΔU непрерывно измеряется усилителями-регистраторами И-37-Н309 или "Сервогор" с чувствительностью до $0,5$ мкВ (реальная амплитуда сигнала позволила работать с более грубой чувствительностью порядка 10 мкВ). Величина ΔT измеряется такой же аппаратурой.

В качестве диссипативного процесса-источника использовались процессы смешения, изобарического нагревания и фазовых переходов – плавления и испарения. Наиболее эффективным оказался (как и следовало ожидать по величине изменения энтропии ΔS) процесс кипения воды. Поэтому в основной серии экспериментов использовался источник, представляющий стеклянный сосуд, в котором нагревателем мощностью $1,2$ кВт вода с начальным объемом 2 л нагревалась от точно измеренной начальной температуры (примерно равной температуре воздуха в лаборатории) до кипения, Кипение длилось до испарения 1 л, после чего нагреватель выключался.

4. ВЫПОЛНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Предварительная стадия эксперимента длилась около года и включала изучение собственных шумов установки, выбор оптимального режима измерений, испытание различных вариантов источников.

Главная стадия эксперимента выполнялась в течении 3 месяцев (август-октябрь 1999г.) Всего было выполнено 50 экспериментов. Основным материалом был получен при многократном повторении опыта в точности одинаковой следующей постановке. Процесс-источник – фазовый переход (кипение воды), $r=0,5$ м. После включения нагревателя вода закипает за 12-14 мин (в зависимости от лабораторной температуры), кипение длится 40 мин. Элементарный расчет дает полное изменение энтропии в источнике $\Delta S = 5,85 \cdot 10^{26}$ нат. Изменение лабораторной температуры на 10 К сказывается лишь в третьем знаке этой величины. Основную часть ΔS составляет изменение энтропии в фазовом переходе вода-пар ($4,39 \cdot 10^{26}$ нат). Таким образом, ΔS источника была равна указанной постоянной для всех описываемых ниже опытов.

В связи с большим временем релаксации детекторов в течении суток можно было корректно выполнить не более одного опыта. От начала к концу серии лабораторная температура плавно снижалась от $\sim 30^\circ\text{C}$ (начало августа) до $\sim 10^\circ\text{C}$ (конец октября). Отопление и иные источники тепла в лаборатории отсутствовали.

47 опытов проводилось при фиксированном положении источника относительно обоих детекторов. Для 3 опытов источник был перенесен к другому детектору на $r=0,5$ м, чтобы убедиться, что это изменяет знак разностного сигнала (при неизменной схеме вычитания).

В промежутках между опытами измерительная часть установки работала в непрерывном режиме. Это позволяло избежать возможного влияния прогрева аппаратуры в каждом опыте. Кроме того, непрерывная запись ΔU позволяла иметь уверенность в существенном превышении эффекта воздействия искусственного процесса над случайными шумами.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно уравнению макроскопической нелокальности [5-7, 9] увеличение энтропии в источнике влечет ее увеличение в пробном процессе (с геометрическим затуханием по закону обратных квадратов). В свою очередь, из (1) это соответствует уменьшению ΔU . Таким образом, из теории следует $\Delta S > 0 \Rightarrow \Delta U < 0$.

Главный качественный результат эксперимента состоит в том, что нелокальная реакция детектора надежно регистрируется и ее знак соответствует теоретическому предсказанию. Порядок амплитуды ΔU_m – милливольты. Локальное тепловое воздействие источника существует, но ничтожно мало по сравнению с нелокальным. Внутренняя температура ближнего к источнику детектора увеличивается в результате воздействия всего на несколько тысячных градуса. При известном температурном коэффициенте электродов (-0,19

mB/K [5]) это соответствует изменению ΔU на величину порядка микровольта, т.е. нелокальный сигнал на три порядка превышает локальный.

При этом главной неожиданностью оказался очень большой количественный разброс параметров сигнала при строго одинаковых условиях воздействия. Амплитуда сигнала, время запаздывания, время падения и роста (релаксации) ΔU от опыта к опыту менялись в широких пределах, и эти изменения не были связаны с какими-либо изменениями внешних условий (метеорологических, геомагнитных и т.п.). Единственное изменение в лабораторных условиях – отмеченное выше постепенное снижение температуры от начала к концу трехмесячной серии экспериментов. Однако разброс последовательно получаемых результатов носил совершенно хаотический характер, одинаковый в начале и в конце серии. Есть только некоторая тенденция к росту средней амплитуды сигнала от августа к октябрю, что соответствует ранним результатам [1].

В принципе, возможны два альтернативных объяснения такого разброса: влияние неких внешних факторов на параметры детектора или стохастический характер природы самого изучаемого эффекта. Учитывая накопленные результаты как раз по изучению влияния естественных внешних процессов на собственные потенциалы электродов [5-9], первую гипотезу можно, очевидно, отвергнуть: хаотический характер изменчивости реакции детектора на искусственный процесс совершенно не соответствует изученной непрерывной (хотя и тоже стохастической) изменчивости U , коррелирующей с естественными процессами. Вторая гипотеза вполне вероятна, учитывая квантовомеханическую основу эффекта нелокальности, хотя для ее проверки требуется и более глубокое развитие теории и более богатая статистика экспериментальных данных. Тем не менее, уже полученные в эксперименте данные показали, что параметры сигнала связаны устойчивыми статистическими закономерностями.

На рис.3 показан пример регистрограммы эксперимента. Видно, что через 2ч.10мин. после выключения источника происходит резкое уменьшение ΔU ($\Delta U_m = -5,5mB$) и затем – многочасовая релаксация к исходному уровню. Параллельная запись ΔT показывает, что начало реакции детектора примерно совпадает со временем прихода тепловой волны, но количественно изменение температуры ничтожно: $\Delta T = 0,008K$. Это соответствовало бы уменьшению ΔU благодаря классическому локальному механизму на $0,0011mB$, что несоизмеримо мало по сравнению с зарегистрированным сигналом. Время релаксации температурного возмущения ΔT , как видно из рис.3, несоизмеримо больше времени релаксации ΔU . Совпадение времени прихода термодиффузионной волны с началом нелокальной реакции предсказано в [5] из теоретических соображений (нелокальные корреляции связаны с электромагнитным полем U_i

лера-Фейнмана, причем взаимодействие на микроуровне происходит по межчастичным цепям). На рис.3 содержится также тонкая деталь, наблюдавшаяся примерно в половине опытов - небольшое волнообразное понижение ΔU перед началом основного спада. Природа этого предвестника неясна.

Средние по всей серии экспериментов параметры сигнала таковы: $\langle \Delta U_m \rangle = (-2,46 \pm 1,72) \text{ мВ}$, запаздывание начала эффекта относительно выключения источника $\langle \tau_1 \rangle = (97 \pm 36) \text{ мин}$, запаздывание минимума $\Delta U (= \Delta U_m)$ относительно выключения источника $\langle \tau_2 \rangle = (149 \pm 47) \text{ мин}$. Постоянная времени релаксации оценена $\sim 360 \text{ мин}$. Время практического окончания эффекта определяется наименее точно. Приблизительно время восстановления (от $\Delta U = \Delta U_m$ до практического окончания эффекта) t_2 оказалось в среднем $\langle t_2 \rangle \approx 8 \langle t_1 \rangle$, где t_1 – время падения $\Delta U (t_1 = \tau_2 - \tau_1)$.

Перейдем к описанию упомянутых статистических закономерностей.

Во-первых, кривая ΔU существенно асимметрична. Уравнение регрессии t_2 по t_1 (в минутах):

$$t_2 = 8,76t_1 - 126 \quad (2)$$

при коэффициенте корреляции $0,91 \pm 0,05$.

Во-вторых, эта асимметрия пропорциональна амплитуде сигнала $|\Delta U_m|$ (в мВ).

$$t_2/t_1 = -3,2 \Delta U_m + 0,39 \quad (3)$$

при таком же коэффициенте корреляции.

В третьих, обнаружена нелинейная связь полной длительности эффекта $t_e = t_1 + t_2$ с амплитудой сигнала :

$$t_e = t_s [\exp(-\Delta U_m/E) - 1], \quad (4)$$

где эмпирическая оценка $t_s = 40 \text{ мин}$, что равно длительности основного процесса - фазового перехода в источнике. Эмпирическая оценка параметра E показала, что с точностью до второго знака E определяется следующей комбинацией фактических параметров нашего детектора:

$$E = \frac{\sqrt{6kTg}}{|q|}, \quad (5)$$

где $q = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ А} \cdot \text{с}$ (одновалентные ионы электролита), $T = 293 \text{ К}$ (средняя температура детектора), $g = 0,013$ (коэффициент вариации данного детектора). Сопоставляя (4) и (5) с (1), видим, что полная длительность эффекта определяется только длительностью воздействия и изменением энтропии двойного слоя:

$$t_e = t_s (\exp \Delta S_d - 1) \quad (6)$$

В четвертых, аналогично (4) эмпирическая связь установлена между t_e и τ_2 :

$$t_e = t'_s (\exp(\tau_2/\vartheta) - 1), \quad (7)$$

где $t'_s = 37$ мин, $\vartheta = 49$ мин. Сопоставление (7) и (4) показывает, что увеличению запаздывания τ_2 соответствует увеличение амплитуды $|\Delta U_m|$. Иначе говоря, выходу детектора из равновесного состояния предшествует некоторый процесс накопления энергии.

Из перечисленных эмпирических связей наиболее интересна связь (6). Перепишав ее в виде :

$$\Delta S_d = \ln \left(\frac{t_e + t_s}{t_s} \right), \quad (8)$$

можно заметить, что правая часть (8) при $t_s \ll t_e$ равна $\sup S^1$ – верхней грани энтропии определенной в первом слое расслоенного пространства определения оператора вероятности [15]. Иными словами, S^1 – это энтропия, определенная по самой кривой $\Delta U(t)$, рассматриваемой при нормировке на ее интеграл как распределение вероятности. Таким образом, равенство

$$\Delta S_d = \sup S^1 \quad (9)$$

устанавливает прямую связь между пространственным и временным изменением энтропии – между перераспределением зарядов в двойном слое и временном распределении ΔU .

Итак, несмотря на большой разброс параметров сигнала в идентичных опытах, эти параметры связаны между собой вполне определенными и важными закономерностями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Качественные результаты эксперимента по измерению эффекта нелокальности искусственно возбуждаемых диссипативных процессов подтверждают ее универсальный характер, согласуются с теоретическими выводами [5, 6] и результатами экспериментов [5-9] с естественными диссипативными процессами.

Важнейшей вновь обнаруженной чертой нелокальной реакции пробного процесса на фиксированный процесс-источник является ее стохастический характер. Это позволяет по-новому взглянуть на стохастический характер реакции детектора на крупномасштабные геофизические и гелиофизические процессы. Если в [5-9] конечность корреляционных функций и функций независимости рассматривалась в основном как результат множественности источников, то теперь можно утверждать, что это имеет более глубокие внутренние причины. Их рассмотрение требует развития теории макроскопической нелокальности, находящейся пока в зачаточном состоянии.

С другой стороны, описанные результаты показывают необходимость новых подходов в постановке дальнейших экспериментов. Принятая в нашем эксперименте стратегия натолкнулась на ограничение: требуется резкое увеличение статистики (сотни и тысячи опытов). При темпе, задаваемом време-

нем релаксации, – не больше одного опыта в сутки – такое исследование займет годы. Очевидно, что за это время параметры электродов изменятся и результаты начала и конца серии станут несопоставимы, появится сезонность и т.п. Альтернатива – использование большого числа детекторов также затруднительна, поскольку электроды при сколь угодно тщательном изготовлении имеют большой разброс параметров. Даже подбор двух пар, способных работать в дифференциальном режиме, как в нашей установке, составил непростою проблему. Это усугубляется необходимостью иметь электроды с многолетней предварительной выдержкой в стандартном электролите. Выход, вероятно, состоит в разработке технологии искусственного старения электродов или в использовании пробных процессов иного типа.

Авторы благодарят Ю.М. Абрамова за участие в конструировании экспериментальной установки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Козырев Н.А., *Избранные труды*, ЛГУ, 1991.
2. Home D., Majumdar A.S., *Phys. Rev.* **A52**, (1995), p. 4959.
3. Cramer J.G., *Phys. Rev.*, **D22**, (1980), p. 362.
4. Hoyle F. and Narlikar J.V., *Rev. Mod. Phys.*, v.67, (1995), p. 113.
5. Коротаев С.М., Сорокин М.О., Сердюк В.О. и др., *Физическая мысль России*, №2. (1998), с. 1.
6. Korotaev S.M., Serdyuk V.O., Sorokin M.O. et al., *Physics and Chemistry of the Earth*, **A24**, (1999), p. 735.
7. Коротаев С.М., Сорокин М.О., Сердюк В.О. и др., *Наука и технология в России*, №1(31), (1999), с.16.
8. Дворук С.К., Коротаев С.М., Морозов А.Н. и др., *Прикладная механика и технологии машиностроения*, Вып.1(4), (1998), с.61.
9. Коротаев С.М., Сердюк В.О., Сорокин М.О., *Геомагнетизм и аэрономия*, т.40, (2000), с.
10. Savage D. *Toth-Maatian Review*, v.4, (1985), p.1899.
11. Savage D., *Toth-Maatian Review*, v.4, (1986), p.2257.
12. Savage D., in *Progress in Space-Time Physics*, (Ed. Wesely B.), West Germany, Blumberg, (1987), p.242.
13. Лаврентьев М.М., Еганова И.А., Луцет М.К. и др., *ДАН*, т.317, (1991), с.635.
14. Зимин Е.Ф., Богородский М.М., *Физика Земли*, №10, (1996), с.31.
15. Коротаев С.М., *Геомагнетизм и аэрономия*, т.35. (1995), с.116.