

УДК 530.145: 534.29; 537.635; 536.7; 534.422.2; 573.3; 539.194; 538.56; 462.64; 530.7; 147.573.3

**У.Х. Копвиллем**, **Р.З. Шарипов**

## **КОГЕРЕНТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ МИКРОВОЛНОВЫХ АКУСТИЧЕСКИХ, ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ, ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В СРЕДАХ И ОБРАЗЦАХ РАЗНОЙ ПРИРОДЫ**

Предлагается обзор экспериментальных работ по исследованию микроволновых акустических, магнитных и электрических эхо явлений в кристаллических и аморфных структурах. Приведены результаты с использованием электронного парамагнитного резонанса в исследованиях процессов самоорганизации простейших живых систем. Сообщается о возможности регистрации подводного ландшафта по динамике диэлектрической проницаемости приводного слоя атмосферы. Обсуждаются обнаруженные в биологических объектах сигналы свободной индукции и эха диэлектрической проницаемости, вызванные световыми импульсами малой интенсивности. Излагаются последние результаты, полученные авторами в этом направлении.

### **Введение**

В данной статье попытаемся в хронологической последовательности изложить некоторые, впервые экспериментально обнаруженные нами эхо явления, которые затем исследовались или должны будут исследоваться в других лабораториях. Пусть не смутит читателя кажущаяся разнородность представленных здесь объектов, явлений и методов исследования. Все эффекты, которые мы обсуждаем, являются результатом взаимодействия среды со сверхвысоко частотным электромагнитным полем с длиной волны 3 см. В каждом конкретном случае использовалось либо импульсное, либо непрерывное воздействие СВЧ-полем. В зависимости от физических свойств образца и системы, с которой поле взаимодействует, в среде могут возбуждаться акустические, магнитные и электрические когерентные состояния. Эти состояния, динамичные по объему образца, дают возможность использовать многие эффекты в практических целях.

В 1968 г. появилось сообщение [1] о наблюдении электронного спинового эха (ЭСЭ) в рубине на частоте  $10^{10}$  Гц. Эффект наблюдался на переходе  $|+1/2\rangle \leftrightarrow |-1/2\rangle$  в образце, содержащем  $3 \cdot 10^{-5}$  ат. % ионов  $\text{Cr}^{3+}$ . В этом сообщении сделан существенный вывод, что для надежного наблюдения сигнала эха недопустимо отклонение направлений постоянного магнитного поля  $\mathbf{H}_0$  и тригональной оси кристалла  $\mathbf{C}$  на угол  $\Theta > 2^\circ$ . Таким образом, были определены весьма жесткие условия, при которых наблюдается ЭСЭ в рубине. Но поскольку система  $\text{Cr}^{3+}$  в  $\text{Al}_2\text{O}_3$  очень перспективна для исследования различных коллективных процессов в присутствии акустических и электромагнитных полей, постановка дальнейших опытов по обнаружению когерентных откликов для нас казалась необходимой.

Известно, что в технике ЭСЭ нужно пользоваться компромиссными условиями между чувствительностью прибора и разрешающей способностью по времени. Оба показателя зависят от добротности резонатора. Обычное значение добротности  $Q \leq 500$ . Это позволяет иметь чувствительность при некогерентном приеме  $N_{\text{мин}} \sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$  и разрешающую способность  $\sim 10^{-7} \text{ с}$ . Такие характеристики прибора создают ограниченные возможности для успешного проведения эксперимента. Поэтому мы поставили перед собой цель найти другой квантовый переход с более выгодными условиями для наблюдения ЭСЭ в рубине. Образец кристалла в виде цилиндра был помещен в трубку из плавленого кварца. Трубка служила одновременно держателем образца и элементом, который, благодаря своим диамагнитным свойствам, может концентрировать локально около себя магнитную составляющую СВЧ-поля. Это обстоятельство приводит как бы к увеличению добротности в объеме образца, в то время как добротность резонатора сохраняется.

Велико же было наше удивление, когда после воздействия двумя электромагнитными импульсами при нулевом магнитном поле ( $\mathbf{H}_0 = 0$ ) на экране осциллографа увидели сигнал эха, <виновником> которого было кварцевое стекло. Это было первым наблюдением эха в стеклах.

## 1. Нерезонансное возбуждение фазовой памяти в осциллирующих системах

Динамическая фазовая память на двухуровневых системах в стеклах была открыта в 1971 г. [2]. Стекла отличаются от кристаллических тел тем, что атомы и молекулы в них не образуют плотную упаковку. В ней возникают пустоты и поэтому взаиморасположение атомов и молекул становится не единственно возможным с точки зрения минимума потенциальной энергии. Стеклообразное состояние вещества можно представить себе как некоторое возбужденное состояние кристалла, в котором спонтанно нарушена трансляционная инвариантность. Существование пустот в стекле приводит к тому, что для многих атомов или групп атомов существует возможность занимать два эквивалентных положения в пространстве образца, причем этим положениям соответствуют различные энергетические состояния атомов. В этом случае атом может совершать переходы между этими двумя уровнями энергии и образовывать <пространственно-двухуровневые> частицы.

Такой подход к пространственной структуре стекол позволяет хорошо описать низкотемпературную удельную теплоемкость, теплопроводность, ультразвуковое и диэлектрическое поглощение. Основным источником, формирующим фазовую память системы, является широкий разброс собственных частот двухуровневых центров, достигающий ширины спектра Дебая, то есть  $T_2^* \sim 10^{-12}$  с. Если длительность импульса, возбуждающего частицы, будет  $\Delta t$ , то из всех  $N \sim 10^{23}$  таких частиц в единице объема в формировании отклика будет участвовать  $N_1$  частиц, причем  $N_1 \sim N T_2^*/\Delta t \sim 10^{18}$  при  $\Delta t \sim 10^{-8}$  с.

<Пространственно-двухуровневые> частицы в стеклах обладают большими упругими дипольными моментами, хорошо возбуждаются звуком и генерируют сигналы фононного эха [3], так как их физическая природа связана с перемещениями в пространстве. Это перемещение связано с перегруппировкой зарядов внутри молекулы. Исследования эха в стеклах при низких и сверхнизких температурах показывают, что способность генерировать сигналы эха в виде звуковых и электрических импульсов является характерной особенностью <пространственно-двухуровневых> частиц.

Основные свойства описываемого явления следующие:

- а) сигнал имеет электрическую природу и поэтому максимальная его интенсивность наблюдается в пучности электрического поля измерительного резонатора;
- б) эффект наблюдается в нулевых магнитных и электрических поляризующих полях;
- в) зависимость амплитуды эха в некоторых образцах от внешнего магнитного поля связана с наличием парамагнитных примесей, которые в нем поляризуются, приводя тем самым к подавлению активности <пространственно-двухуровневых> частиц;
- г) сигнал хорошо наблюдается при температуре 4,2°К;
- д) для наблюдения эха не требуется каких-либо резонансных условий, оно наблюдается в широком диапазоне частот.

Нами проводились планомерные поиски различных эхоэффектов во всевозможных веществах на основе идеи [4], что динамическая фазовая память является фундаментальным свойством вещества и может присутствовать во всех его видах. В результате нами был обнаружен эффект, получивший название поляризационного эха (ПЭ), который является электромагнитным откликом сегнетоэлектрического кристалла на импульсное возбуждение электрической компонентой СВЧ-поля.

Мы будем обсуждать только такие свойства ПЭ, которые наблюдаются в сегнетоэлектрических кристаллах на СВЧ и наблюдались в наших экспериментах.

Отклик на двух- или трехимпульсное воздействие появляется в широком частотном диапазоне без характерных резонансных особенностей. Сигнал эха наблюдается только при температуре 4,2°К, когда длительность импульсов и время между импульсами меньше некоторых релаксационных времен. При определенных условиях наблюдаются многократные эхосигналы в моменты времени  $3\tau$ ,  $4\tau$  и т.д. [5].

Для наблюдения сигнала наиболее эффективным оказался цилиндрический резонатор TE<sub>112</sub>-типа. Сигнал максимален, когда образец находится в пучности электрического поля. В коаксиальном резонаторе, обычно используемом для возбуждения гиперзвука, интенсивность сигналов значительно меньше. Это связано с тем, что в коаксиальном резонаторе <работает> только небольшая часть объема образца, в цилиндрическом же резонаторе отклик формируется полным его

объемом. Это позволяет сделать вывод, что эхо формируется во всем объеме исследуемого образца, а ПЭ имеет электрическую природу. Основные свойства сигналов ПЭ следующие:

1) последовательность двух импульсов, сформированных в моменты времени 0 и  $\tau$ , вызывает появление сигнала эха в момент времени  $2\tau$ , который убывает с характеристическим временем  $T_2$  по закону  $\exp(-2\tau/T_2)$ ;

2) в некоторых кристаллах последовательность трех импульсов, сформированных в моменты времени 0,  $\tau$ ,  $\tau_1$ , позволяет наблюдать стимулированное эхо в момент времени  $\tau_1 - \tau$ , который спадает по закону  $\exp[-2\tau/T_2] \exp[-(\tau_1 - \tau)/T_1]$  [6];

3) в широком частотном диапазоне интенсивность сигналов заметно не изменяется;

4) возбуждение эха обусловлено электрической составляющей электромагнитного поля;

5) интенсивность сигналов в десятки раз выше, чем у сигналов спинового эха свободных радикалов;

6) в пределах  $0 \div 1,2$  Тл сигналы не зависят от постоянного магнитного поля (в беспримесных сегнетоэлектриках);

7) интенсивность эха зависит от ориентации полярной оси кристалла к вектору электрической составляющей СВЧ-поля;

8) эхо появляется только в упорядоченной сегнетоэлектрической фазе;

9) при размельчении образца в порошок исчезают сигналы от возбужденных гиперзвуковых импульсов, но сохраняются сигналы эха;

10) при повышении температуры  $T > 4,2$  К характеристические времена быстро укорачиваются и сигналы эха исчезают;

11) механизм фазовой памяти обусловлен разбросом собственных частот осцилляторов, участвующих в формировании эха.

Обнаруженное и исследованное нами физическое явление [7] используется для идентификации упорядоченного состояния сегнетоэлектриков и изучения их свойств, а также в элементах памяти и обработки сигналов в акустоэлектронике. Круг исследованных объектов состоял из гомологического ряда водород- и дейтерийсодержащих сегнетоэлектриков с температурой фазового перехода около 130 К. Кроме того, исследован ряд высокотемпературных сегнетоэлектриков [5], [8].

Так как формирование ПЭ тесно связано с генерацией звука, представляет интерес изучение влияния постоянных магнитного и электрического полей на сигналы эха и процесс генерации звука. В результате этих экспериментов было показано, что существует прямая связь между качеством кристаллов и формированием ПЭ [9]. В бездефектных монокристаллах, например,  $\text{LiNbO}_3$ , используемых для получения второй гармоники в лазерах, сигнал эха, как правило, не наблюдается, так как отсутствует источник неоднородного уширения  $1/T_2^*$ . Любое нарушение структуры (полидоменность, наличие примесных ионов, дислокаций, воздействие постоянным электрическим полем с большим градиентом неоднородности) приводит к появлению такого источника и возникновению сигнала эха.

Имея в виду это обстоятельство, нами исследованы сегнето-электрические кристаллы с парамагнитными примесями  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{LiNbO}_3:\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{LiNbO}_3:\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}^{2+}$ . Это позволяло привлечь для исследования метод ЭСЭ. Так как скорость парамагнитной релаксации спиновой системы пропорциональна концентрации ионов, то сигнал ЭСЭ хорошо наблюдается при малых концентрациях. В то же время наблюдение ПЭ становится затруднительным из-за малости  $1/T_2^*$  электрической дипольной системы. Увеличение концентрации ионов приводит к существенному уменьшению времен релаксации и, как следствие, к исчезновению спинового эха, в этом случае хорошо наблюдается сигнал ПЭ.

Учитывая все сказанное, мы поставили ряд экспериментов по ПЭ в постоянном магнитном поле. Наиболее подробно опишем результаты, полученные в кристалле  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}^{3+}$ , в котором концентрация ионов составляла  $\sim 0,05\%$ . Магнитное поле прикладывалось параллельно оптической оси кристалла. При воздействии на образец одиночным СВЧ-импульсом возникает картина затухающих, переотраженных импульсов от <блуждающего> по образцу, генерированного в нем гиперзвукового импульса. Экспоненциальный спад его характеризует фоновое затухание звука на частоте возбуждения. В магнитном поле  $\sim 0,12$  Тл затухание звука уменьшилось на  $\sim 10$  Дб. Кроме того, исследована зависимость ПЭ от величины магнитно-

го поля и в характерных точках измерялось время релаксации  $T_2$  для ПЭ. Изменение  $T_2$  с увеличением магнитного поля показывает, что ПЭ тесно связано с акустической добротностью образца, а  $T_2$  и коэффициент затухания звука обратно пропорциональны. Так как парамагнитные примеси являются точками закрепления дислокаций в кристалле, эти наблюдения указывают на механизм связи между дислокациями и парамагнитными примесями, а это может приводить к поляризации дислокаций в магнитном поле и к существенному изменению дислокационного поглощения звука в кристалле.

Магнитное поле влияет не только на поглощение гиперзвука, но и на формирование ПЭ, которое связано с механизмом неоднородного уширения или фазовой релаксации за счет взаимодействия дислокаций. Такое взаимодействие можно рассматривать в модели Френкеля–Конторовой как взаимодействие линейных дислокаций с перегибом. Если ограничиться парным взаимодействием, то две дислокации, каждая из которых имеет по перегибу, могут образовывать устойчиво связанные образования – бризеры [10].

Рассматривая кристалл как термостат с газом дислокаций, можно считать, что в нем существует термодинамическая подсистема бризеров с разбросом частот и колебаний. Этот разброс частот с учетом взаимодействия бризеров с фононами решетки соответствует механизму неоднородного уширения. Роль первого импульса в формировании ПЭ состоит в создании когерентного состояния бризеров в кристалле. При этом должно выполняться условие  $\Delta t < T_2^*$ , где  $\Delta t$  – длительность импульса, а  $T_2^*$  – время обратимой фазовой релаксации. Когерентность состоит в том, что все бризеры будут колебаться с одинаковой фазой. Взаимодействие бризеров с фононами приводит к расфазировке после прекращения импульса. Наложение второго импульса обращает механизм фазовой релаксации. Таким образом, действует классический механизм формирования эха, в котором лишь вводится предположение о формировании эха за счет колебаний спаренных линейных дислокаций с перегибом, с которым связаны элементарные электрические дипольные моменты.

Нами также было исследовано влияние постоянного электрического поля на распространение гиперзвука в монокристаллическом беспримесном кристалле  $\text{LiNbO}_3$ . В этом поле происходит статическая поляризация дислокационной структуры, подобная разработанной выше. В нашем случае наиболее эффективное «улучшение» акустического прохождения достигнуто при напряженности электрического поля  $E_0 \sim 10^4$  В/см, приложенного перпендикулярно оптической оси  $C$  кристалла. Поскольку дислокационная структура каждого кристалла одного и того же класса индивидуальна, то такое «улучшение» акустических свойств должно происходить при различных значениях  $E_0$ .

Действие радиочастотного электрического поля вызывает модуляцию экспоненциального спада сигнала ПЭ, глубина которой зависит от уровня этого поля. Возникновение таких осцилляций связано с модуляцией энергетического спектра центров, формирующих сигнал ПЭ. Теория подобного эффекта хорошо разработана для случая спиновых систем и может быть использована для осцилляционных центров. Этот эффект нами наблюдался в полидоменном кристалле  $\text{LiTaO}_3$ . Все описанные здесь результаты подробно представлены в [1–12].

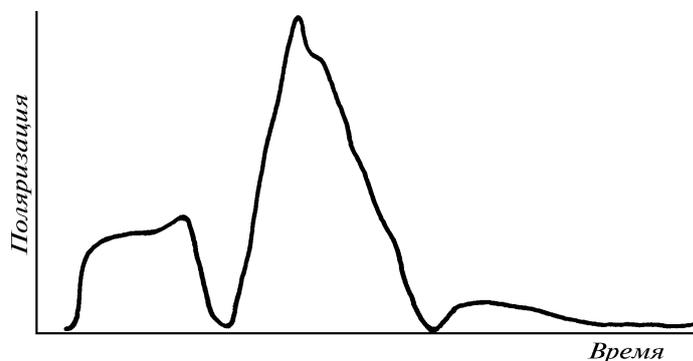


Рис. 1. Одноимпульсное радиочастотное эхо на вулканическом песке

В заключение этого раздела предлагаем результаты по ПЭ, полученные С.Б. Зверевым в вулканическом песке, образующем черные пляжи островов вулканического происхождения [13]. Пробы отбирались у подножия вулкана Менделеева на о. Кунашир. Уникальность объекта состоит и в том, что в его состав входят пироксен 80%, гидроокись железа 3%, мартит 3%, амфибол 2%, оливин 2% и зерна различных пород. Это позволяет путем использования определенной технологии отбора выделить из объекта фракции с различными свойствами. В результате наблюдалось ПЭ в вулканическом песке, из которого были удалены кварцевые и магнитные фракции. То есть на той составляющей пробы, которая меньше всего обладает магнито- и электроупругой нелинейностью, необходимой для формирования ПЭ. Обнаружено одноимпульсное ПЭ, свойственное для упорядоченного, антиферромагнитного состояния среды (рис. 1).

Эхо наблюдалось в диапазоне 13,25÷15,50 МГц. При возрастании интенсивности накачки сигналы эха возрастали по закономерностям осцилляционного эха, причем наблюдался эффект накопления интенсивности при увеличении числа пар возбуждающих импульсов. При частоте следования пар импульсов 100 Гц в течение 2 с амплитуда возрастала до некоторого предельного значения, после чего происходило <схлопывание> сигнала эха до первоначального значения. При уменьшении частоты следования пар до 1÷10 Гц эффекты накопления и <схлопывания> исчезали. При измельчении песка интенсивность эха уменьшалась и для его повторного возбуждения требовались более короткие радиочастотные импульсы. Сигналы индукции наблюдались при комнатной температуре, а сигналы эха – только при температуре 77 К. Встряхивание или поворот образца приводили к исчезновению сигнала. Для восстановления сигнала эха требовалось проводить поиск новых резонансных условий путем сканирования частоты и подбора фазовых соотношений в радиочастотном заполнении импульсов. Эффект наблюдался в катушке индуктивности рабочего контура, но в электрическом поле конденсатора сигнал был наиболее интенсивным. Обнаруженное эхо зависит от температуры, химического состава и структуры образцов, метода возбуждения, что делает его ценным инструментом для гео- и физических исследований. Большая часть экспериментов выполнена в полевых условиях.

## 2. Электронное спиновое эхо в рубине

В этой части мы предполагали изложить результаты наших исследований по экоспектроскопии магнитных систем в кристаллических матрицах структуры лейкосапфира. Эти исследования выполнены на следующих объектах:  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}^{3+}$ . Однако, по нашему мнению, достаточно остановиться на данных по ионам  $\text{Cr}^{3+}$  в  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , ибо здесь требуется более тонкий подбор удобных экспериментальных условий. В других перечисленных объектах каких-либо трудностей для наблюдения эха не возникает. Кроме того, рубин является отличным объектом для изучения коллективных процессов посредством смешения различных полей, например, электромагнитного и акустического.

Как уже было сказано, в первых опытах с рубином были определены условия, при которых возможно детектирование ЭСЭ. После анализа имевшихся данных мы пришли к выводу, что квантовый переход  $3 \leftrightarrow 4$  в поле  $H_0 \sim 0,54$  Тл с ориентацией  $\Theta = \pi/2$  магнитного поля относительно оптической оси может оказаться наиболее выгодным для наблюдения эха. Действительно, в монокристалле  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$  при концентрации ионов хрома  $\sim 3 \cdot 10^{-4}$  на частоте  $9,56 \cdot 10^9 \text{ c}^{-1}$  был обнаружен сигнал ЭСЭ. В отличие от существовавших данных, впервые удалось детектировать сигнал эха в рубине при такой концентрации активных примесей. Показано, что в случае перпендикулярной ориентации статического магнитного поля  $\mathbf{H}$  относительно оптической оси  $\mathbf{C}$  кристалла флуктуации ядерной намагниченности не искажают огибающую спада экосигнала. Были выполнены эксперименты для очень малой концентрации ионов хрома  $\sim 3 \cdot 10^{-6}$ . В этом случае сигналы эха наблюдались на всех квантовых переходах для ориентации  $\mathbf{H} \parallel \mathbf{C}$ , а когда она оказывалась в положении  $\mathbf{H} \perp \mathbf{C}$ , ЭСЭ обнаруживалось и при температуре 77°К. Все измерения проводились с образцами, имеющими плоскопараллельные, полированные торцы. Это позволяло использовать их в экспериментах с гиперзвуковыми полями. В качестве генераторов звука использовались стержни из кристаллического кварца и пьезополупроводниковые пленки CdS. Преобразователь из такого элемента помещался в пучность электрического поля измерительного резонатора. В дальнейшем такие эксперименты были выполнены.

Необходимо отметить, что в отличие от перпендикулярной ориентации  $\mathbf{H} \perp \mathbf{C}$  при  $\mathbf{H} \parallel \mathbf{C}$  спад сигнала эха в зависимости от интервала между возбуждающими импульсами носит осцилляционный характер. Это связано с тем, что между парамагнитным ионом и ближайшим окружением из магнитных моментов ядер существует анизотропное сверхтонкое взаимодействие (СТВ). Такая же модуляция спада ЭСЭ наблюдается и в  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Fe}^{3+}$  при любой ориентации магнитного поля  $\mathbf{H}_0$  относительно оси  $\mathbf{C}$ . Сигналы наблюдались на всех квантовых переходах ионов  $\text{Fe}^{3+}$ . В  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}^{3+}$  модуляционной структуры не обнаружено. Следствием этого может быть то, что кристалл обладает пьезоэлектрическими свойствами, из-за которых в образце после каждого зондирующего импульса возникает поле упругих волн. Это поле открывает дополнительный канал для процессов кросс-релаксации, при которых СТВ затормаживаются.

Известно, что для наиболее полной интерпретации модуляционной структуры спада ЭСЭ иона необходимо знать конфигурацию ближайшего окружения, а также о влиянии более удаленных соседей. Экспериментально влияние на парамагнитный ион ядер кристаллического остова можно изучать, воздействуя подходящим радиочастотным полем на определенное ядро в соответствии с величиной постоянного магнитного поля. То есть таким образом можно перейти к экспериментам по импульсному двойному электронно-ядерному резонансу. Кроме того, нужно иметь в виду, что обычно в экспериментах по ЭСЭ полное возбуждение спектра электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) трудно достижимо, а потому в большинстве случаев ЭСЭ исследуется в условиях частичного возбуждения спектра. Все эти вопросы достаточно полно освещены в [14]. Наши результаты приведены в работах [5, 15, 16, 17].

### 3. Детектирование посредством ЭПР спиновых меток процессов самоорганизации в простейших живых системах

Согласно общим представлениям о сильнонеравновесных физических явлениях, предположим, что летальный процесс в любой самоорганизующейся биологической системе протекает следующим образом: неравновесность системы нарастает до достижения некоторой критической точки с последующим лавинообразным распадом этого состояния. Общие черты такого явления обобщены в понятии лавины [18], теория которой описывает распад произвольного сильнонеравновесного состояния некоторой физической системы. Нами обнаружен один из возможных параметров такого процесса – запрещенная линия ЭПР иона  $\text{Mn}^{2+}$  в планктоне ноктилюки. Эта линия непосредственно позволяет измерить параметр аксиального внутримолекулярного кристаллического поля в живом планктоне, которое синхронно изменяется с лавинообразным распадом, характеризующим летальный процесс в ноктилюке. Этот планктон редко появляется в прибрежных водах, однако весной 1980 г. в заливе Петра Великого по невыясненным причинам появились большие его скопления, что также послужило причиной использования его в наших экспериментах.

Процесс <индикации> отравления планктона ионами  $\text{Mn}^{2+}$  осуществлялся посредством наблюдения ЭПР-спектров ионов  $\text{Mn}^{2+}$ , усваиваемых организмом планктона вплоть до критических концентраций  $C_k$ . Из спектра ЭПР определена константа  $D$  спинового гамильтониана иона в организме ноктилюки. Таким образом, можно получить определенное представление о временной эволюции величины  $D(t) \equiv P(t)$ , где  $P$  – некоторый коллективный параметр, характеризующий развитие лавины. Такой эксперимент (<активный ЭПР>) существенно отличается от обычного ЭПР на ионах  $\text{Mn}^{2+}$  в различных средах (<пассивный ЭПР>) тем, что в <пассивном> ЭПР ионы  $\text{Mn}^{2+}$  дают информацию о статике и динамике среды с фиксированными физическими свойствами, а в данном случае среда обладает разветвленной сетью обратных связей, которые приводят к эволюции во времени свойств системы под действием внутреннего механизма авторегуляции в организме.

В наших исследованиях были использованы три методики взаимодействия  $\text{Mn}^{2+} \leftrightarrow$  планктон.

1. Маленькие кристаллики соли  $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  бросались в пробы с планктоном, полученные из морской воды при помощи планктонной сетки типа <газ>. Результат наблюдался с помощью микроскопа со 100-кратным увеличением (поле зрения микроскопа составляло  $\sim 0,3 \text{ см}^2$ ), причем изменялась глубина резкости. Характерные размеры ноктилюки  $\sim 10^{-2} \text{ см}$ .

Визуально можно было наблюдать зависимость продолжительности жизни отдельной ноктилюки от расстояния между ней и кристалликом соли.

2. Соль  $MnCl_2 \cdot 4H_2O$  растворялась в морской воде, далее этот раствор прибавлялся к пробе с живым планктоном. В этом случае методом ЭПР не удалось обнаружить проникновение ионов  $Mn^{2+}$  в организм ноктилюки. Можно предполагать, что, начиная с некоторой <несмертельной> концентрации ионов  $Mn^{2+}$  в морской воде  $C < C_k$ , они образуют с диамагнитными солями морской воды такие комплексы, которые трудно проникают через мембрану ноктилюки.

3. Соль  $MnCl_2 \cdot 4H_2O$  растворялась в дистиллированной воде, затем этот раствор добавлялся к образцу с живым планктоном. В данном случае метод ЭПР на ионах  $Mn^{2+}$  регистрировал проникновение и связывание  $Mn^{2+}$  в организме ноктилюки, причем <смертельная> концентрация ионов  $Mn^{2+}$  в растворе  $C_{с.к} \ll C_k$ . Это означает, что в дистилляте ионы  $Mn^{2+}$  образуют комплексы, которые эффективно могут проникать в организм ноктилюки и связываться там с макромолекулами. Назовем указанное явление эффектом  $Mn^{2+}$ -пробоя мембраны.

Таким образом, обнаружена запрещенная линия ЭПР иона  $Mn^{2+}$ , которая свидетельствует о проникновении иона  $Mn^{2+}$  в организм планктона и его связывании с макромолекулами в этом организме. Показано, что параметр внутримолекулярного аксиального электрического поля описывает динамику самоорганизующейся биологической системы. Установлено, что летальный процесс в планктоне при обогащении ионами  $Mn^{2+}$  носит характер бозонной лавины.

Далее мы попытаемся показать, что редкоземельный ион  $Gd^{3+}$  тоже является эффективным парамагнитным зондом для исследования процессов самоорганизации. Информация об окружении и конформационных перестройках в биокомплексе иона  $Gd^{3+}$  в живой системе отражается непосредственно эволюцией тонкой структуры ЭПР иона. Для исследования тонкой структуры ЭПР иона  $Gd^{3+}$  в простейшей живой системе использовался зоопланктон *euphausia superba*. Эксперимент состоял в следующем: 3%-й раствор  $GdCl_3$  в дистилляте вводился в 0,25 мл морской воды с зоопланктоном *euphausia superba* в соотношении приблизительно 1 : 3. Использовалось в среднем 10–15 особей размером  $0,5 \leq l \leq 2$  мм. Время перенесения капилляра с образцом составляло 0,5 мин. Спектр ЭПР записывался на спектрометре РЭ-1308 при температуре 25°C в условиях термостабилизации образца сразу же, через 1 ч и через 15 ч после помещения образца в резонатор. На первой стадии  $\Delta t \leq 1$  происходит интенсификация самоорганизующихся процессов, а это сопровождается ростом константы  $D$ . Далее наступает летальный процесс и после  $\Delta t \geq 15$  часов наблюдается полное отделение ионов  $Gd^{3+}$  от макромолекул и параметр  $D$  принимает значение, характерное для водных растворов солей  $GdCl_3$ .

Итак показано, что редкоземельный ион  $Gd^{3+}$  является эффективным парамагнитным зондом для исследования процессов самоорганизации. По спектру ЭПР связанного в организме иона вычисляются аксиальный  $D$  и ромбический  $E$  параметры тонкой структуры биокомплекса. Зафиксировано изменение этих параметров, определяемое самоорганизующимися процессами в организме. При предельных концентрациях иона  $Gd^{3+}$  на фоне тонкой структуры ЭПР иона выявлены дополнительные переходы, соответствующие сверхтонкой структуре  $Mn^{2+}$ . Делается вывод о синергетическом характере взаимодействия иона с системой самоорганизации живого организма [19, 20, 21].

#### **4. ЭПР и эффекты Яна–Теллера в суперпарамагнитных кластерах морских донных осадков и горных пород**

Методом ЭПР можно эффективно изучать нетривиальные магнитные свойства и релаксационные процессы в суперпарамагнитных (СП) частицах. Наиболее актуально его применение при исследовании мелкодисперсных частиц естественного происхождения. В этом разделе сообщаются результаты ЭПР исследований отдельных частиц, встречающихся в морских донных осадках и породах с г. Белуха Центрального Алтая. Эти объекты представляют собой совокупность мелкодисперсных частиц, объединенных магнитными силами в кластер, который оказывается внедренным в матрицу, состоящую из окиси кремния и окиси алюминия. В горных породах эти кластеры находятся в окружении алюмосиликатов в виде октаэдра с моноклинным искажением. Размеры этих образований не превышают 0,1 мм. Есть основание предполагать, что они имеют вулканическое происхождение.

Поведение их в магнитном поле характеризуется случайными скачками вектора суммарного магнитного момента между направлениями осей легчайшего намагничивания. В этих условиях магнитный момент осуществляет диффузию по телесному углу в потенциальном поле магнитной анизотропии. В спектрах ЭПР СП частиц хорошо проявляются процессы установления равновесной намагниченности (рис. 2).

На участке АВ ансамбль магнитных моментов СП частиц под воздействием электромагнитного и изменяющегося внешнего магнитного поля находится в неравновесном состоянии. Это состояние, связанное с флуктуациями намагниченности, продолжается до тех пор, пока направления намагниченности и внешнего магнитного поля не совпадут. Всегда представляет интерес изучение релаксационных процессов в состоянии неравновесности исследуемой системы. Для этого производился скачкообразный переход стационарного внешнего магнитного поля из одного значения  $H_1$  в другое  $H_2$  (рис. 3). При этом значения  $H_1$  и  $H_2$  лежат внутри интервала АВ (рис. 2). В этом опыте релаксация ансамбля магнитных моментов СП частиц состоит из двух процессов – быстрого и медленного. Сначала быстро устанавливается локальное равновесие внутри отдельных потенциальных ям магнитной анизотропии, а затем путем редких, но быстрых переходов заселенности окрестностей различных осей постепенно выравниваются и система достигает общего термодинамического равновесия. Причем медленный процесс имеет модуляционную структуру, которая характеризует магнитное взаимодействие результирующего момента с окружением.

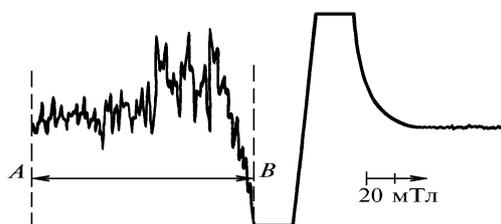


Рис. 2. Спектр ЭПР суперпарамагнитных частиц в морских донных осадках. На участке АВ наблюдаются быстрые флуктуации намагниченности

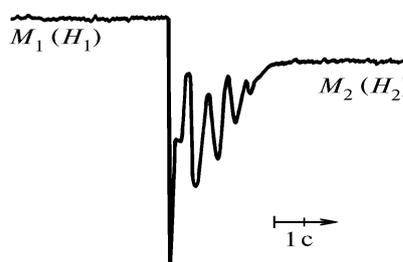


Рис. 3. Релаксация намагниченности после скачка магнитного поля ( $M_1(H_1)$ ,  $M_2(H_2)$  – намагниченности в поле  $H_1$  и  $H_2$ )

Температурная зависимость намагниченности при фиксированном значении магнитного поля в области АВ показана на рис. 4.

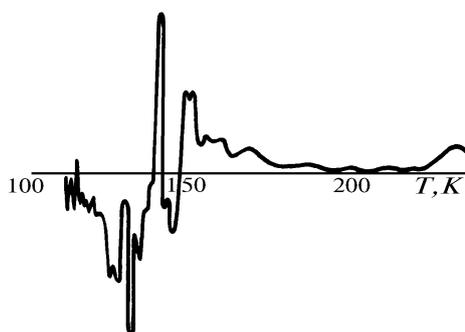


Рис. 4. Температурное изменение намагниченности

Электронный микрондовый анализ показал, что в составе этих частиц присутствуют следующие комплексы:  $Al_2O_3$ ,  $Na_2O$ ,  $K_2O$ ,  $SiO_2$ ,  $FeO$ ,  $MgO$ ,  $CaO$ ,  $MnO$ ,  $TiO_2$ ,  $Cr_2O_3$ . Формульные коэффициенты наиболее весомы для  $Al_2O_3$  – 0,13,  $SiO_2$  – 0,125 и  $FeO$  – 0,279. Таким образом, мы смело утверждаем, что все магнитные осцилляции и другие аномалии обязаны ионам  $Fe^{2+}$ . Известно, что суперпарамагнитное поведение наблюдается в системах с размерами частиц  $< 100 \text{ \AA}$  (порошок Ni в  $SiO_2$  и в  $Al_2O_3$  [22, 23]). Кроме того, известно, что ионы  $Fe^{2+}$  в лигандном окружении с пониженной симметрией являются ян-теллеровскими системами.

Обычно эффект Яна–Теллера связывают с орбитальным вырождением электронного состояния, из-за которого возникает вибронное взаимодействие с неустойчивой конфигурацией атомов решетки. В нашем же случае имеется обусловленный спинами электронов магнетизм, в который решетка не вносит значительного вклада. Однако обменные взаимодействия при воздействии на решетку могут индуцировать структурные переходы, и, наоборот, любое воздействие на решетку может привести к заметным флуктуациям обменных сил. В таких соединениях проявляются многие аномальные свойства: аномальная температурная зависимость магнитного момента, связанная со структурными фазовыми переходами, флуктуации во внешнем магнитном поле и др. В магнетиках, содержащих ионы с орбитально вырожденным основным состоянием, связь орбитальной структуры и магнитного порядка приводит к вышеописанным эффектам, наблюдавшимся в эксперименте. Магнитное поле, действующее на объект, влияет одновременно на орбитальный магнитный момент и на спин-систему. По этой причине зависимость магнитного момента от магнитного поля становится нелинейной. Этим объясняются скачки намагниченности участка АВ (рис. 2), наблюдаемые на спектрах между различными магнитными и орбитальными структурами. Скачкообразное изменение магнитного момента с полем означает проявление метамагнетизма при изотропном взаимодействии. Именно этим, как нам кажется, можно объяснить температурный ход, показанный на рис. 4. Эти переходы, связанные с температурными флуктуациями намагниченности, наглядно демонстрируют динамический эффект Яна–Теллера.

В заключение назовем еще одно положительное свойство магнетиков – магнитную анизотропию (рис. 5). Показанный на рисунке <пропеллер> построен по изменению интенсивности скачков намагниченности в зависимости от угла результирующего магнитного момента по отношению к магнитному полю. Все рассмотренные объекты обладают спонтанной намагниченностью, которая хорошо измеряется при помощи техники ЭПР.

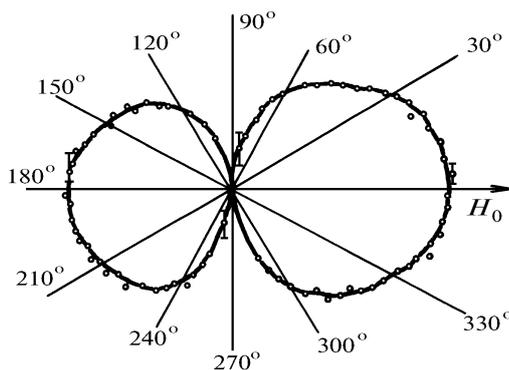


Рис. 5. Угловая зависимость намагниченности

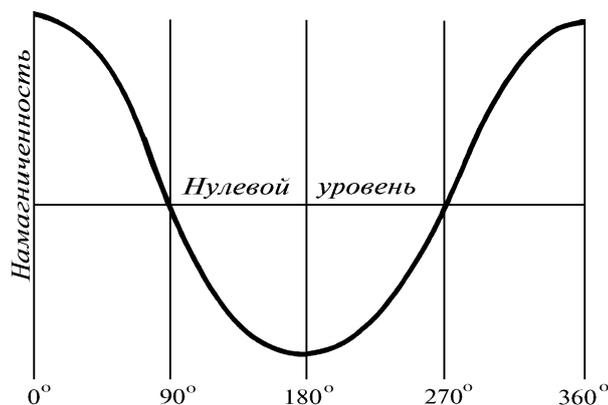


Рис. 6. Измерение спонтанной намагниченности

На рис. 6 иллюстрируется пример измерения начальной намагниченности по этой методике. Здесь изложены не все уникальные физические свойства, обнаруженные нами в этих объ-

ектах, а только та часть, которая уже не требует новых подходов в осмыслении природы явления. Некоторые материалы были представлены в [24, 25, 26].

Как правило, влияние магнитных диполей на поведение квантовой системы менее существенно, чем эффекты, обусловленные электрическими диполями. Так, магнитные диполи можно сравнить по величине с электрическими квадрупольями, магнитные квадрупольи – с электрическими октопольями и т.д. Имея это в виду, мы решили, что электрические характеристики среды дают не менее важную информацию, чем магнитные. Основным электрическим параметром, характеризующим внутренние динамические процессы в среде, является диэлектрическая проницаемость (ДП)  $\epsilon$ . Посредством измерения ДП в динамическом режиме нами получены в ряде исследованных сред некоторые результаты, которые, как нам кажется, могут представлять интерес.

### 5. Томография океанской приповерхностной атмосферы по диэлектрической проницаемости

Измерения ДП приводного слоя атмосферы проводились резонаторным методом в 1988 г. на научно-исследовательском судне <Профессор Богоров>. Эти исследования проводились с целью: 1) изучения пространственно-временных вариаций ДП в пограничном слое вода–атмосфера; 2) выявления зависимости ДП от основных метеопараметров, а также включения более сложных образований типа молекулярных сгустков и взвесей.

Измерения ДП в приводном слое атмосферы производились прибором, в основу которого положен принцип работы двухрезонаторного интерференционного рефрактометра Крейна. Схема состоит из двух каналов, один из которых является опорным с вакуумированным резонатором, другой – измерительным с открытым резонатором. Упрощенная блок-схема приведена на рис. 7.

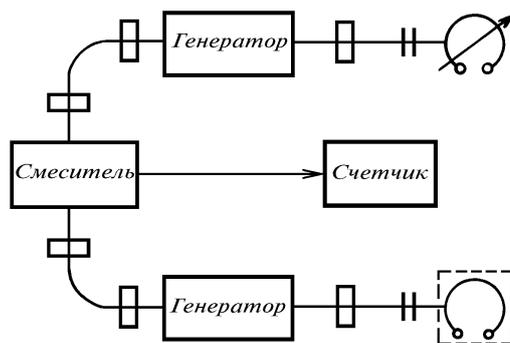


Рис. 7. Блок-схема измерителя диэлектрической проницаемости

Аппаратурный комплекс размещался в лаборатории, отбор проб воздуха производился с верхней палубы по винилпастовой трубке. Закачка воздуха в рабочий резонатор осуществлялась посредством компрессора. Измерения проводились во время движения судна и на станциях с точностью выше чем 99,9%. В результате проведенных исследований на акваториях Тихого и Индийского океанов получена интересная информация о взаимосвязях между динамикой океана и значениями ДП приводного слоя атмосферы. Эта связь позволяет на молекулярном уровне описывать взаимодействие океана с атмосферой.

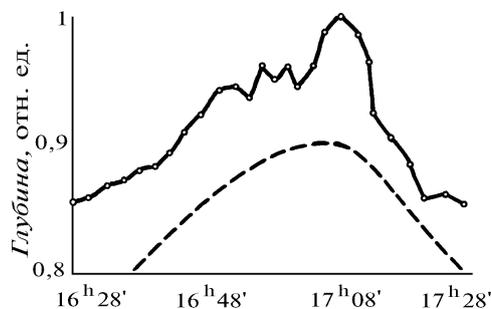


Рис. 8. Эффект <увлечения> диэлектрической проницаемости приводного слоя атмосферы профилем подводной горы

Внимание исследователей-океанологов привлекают районы подводных возвышенностей открытых частей Мирового океана, где возникают особые гидродинамические и биологические условия. Так, 21 ноября 1988 г. в Тихом океане над подводной горой <Кагосима-5> с координатами вершины 35°48' с.ш., 144°20' в.д. был обнаружен эффект <увлечения> показателя преломления, или ДП, профилем горы (рис. 8). На рисунке штриховой линией показан профиль горы, а точками указаны относительные значения коэффициента преломления атмосферного слоя, усредненные за двухминутный интервал. По оси абсцисс отложено судовое время. Высота горы от подножия составляла 4150 м, а глубина вершины от поверхности океана 1650 м.

Известно, что в зонах взаимодействия океанских течений с подводными горами происходит непрерывное образование вихрей. Поэтому над вершинами гор наблюдаются столбы аномальных распределений температуры и солености. Таким образом, эффект <увлечения> показателя преломления или ДП приповерхностного слоя атмосферы профилем подводной горы можно объяснить подъемом глубинных вод к поверхностным слоям. Вследствие этого из-за уменьшения температуры поверхностного слоя воды может образоваться конденсат из пара, обладающий большей ДП. Кроме того, зоны подводных возвышенностей могут быть энергоактивными, в результате чего возникает интенсивный выброс капель воды в атмосферу.

Отметим некоторые наиболее интересные, по нашему мнению, результаты, полученные данным прибором.

а. Детектирование рельефа морского дна на глубинах до 2-х км по изменению ДП на поверхности океана.

б. Установление спектра флуктуаций ДП в приповерхностной атмосфере над океаном на трассе 10 тыс. миль. Амплитуды и частоты зависят от времени и географического расположения, поэтому могут быть использованы для создания карт нового типа. Эти карты позволяют описывать аналитические и динамические особенности морских регионов. Флуктуации и изменения ДП атмосферы в основном вызываются молекулами, кластерами из молекул воды и другими неоднородностями атмосферы, в том числе и биологическими примесями.

в. Обнаружение в спектрах надводной ДП пятиминутных периодов колебаний, которые характерны для Солнца.

Таким образом, ДП воздуха приповерхностного слоя океана может оказаться важным океанологическим параметром и использоваться для самых различных практических целей наряду с другими океанологическими параметрами (температура, давление, соленость, скорость и коэффициент поглощения звука). Наконец ДП может быть ценным динамическим параметром для мониторинга состояния Мирового Океана, Земли и окружающей среды. Она может служить также одним из предвестников природных катастроф типа цунами и тайфунов. Важную роль играют значения электрических диполей и резонансные частоты системы. Имеется возможность оценить вклад биосферы в ДП атмосферы [27–29].

## **6. Когерентные процессы в биологических объектах. Низкочастотные колебания ДП. Индукция и эхо ДП, стимулированные слабым световым потоком**

В этом разделе обсуждаются некоторые физические свойства живых систем, обнаруженные посредством измерения ДП в динамическом режиме. Измерения производились при помощи двухканального микроволнового рефрактометра, описанного выше. Одно плечо, которое состояло из рабочего резонатора, загружалось исследуемым биологическим объектом, другое – эталонным образцом – вакуумом. После интерференции опорного и информационного сигналов, измеряемый параметр регистрировался с погрешностью не более 0,1%.

Был исследован широкий круг биологических объектов различного уровня организации. В экспериментах *in vitro* объектами были красные и зеленые одноклеточные водоросли, плесень, дрожжевые клетки. Опыты *in vivo* проведены с *blattella germanica* и *muska domestica*. На рис. 9 показан фрагмент записи осцилляций ДП в опытах *in vitro*. По оси ординат направлены отклонения ДП относительно некоторого постоянного уровня, по оси абсцисс отложено время. При отсутствии в измерительном резонаторе исследуемого образца на выходе прибора всегда регистрируется прямая линия, которая соответствует постоянной ДП.

На рис. 10 представлен пример записи в опытах *in vivo* с соответствующими объектами. Мы считаем, что характерные выбросы на кривой ответственны за биоритмы находящегося в измерительном резонаторе объекта и они отражают процессы жизнедеятельности.

Из сравнения с рис. 9, где кривая поведения ДП напоминает шумовую дорожку, можно сделать вывод, что в данном случае мы имеем дело с совокупностью одноклеточных водорослей или дрожжевых клеток. В этой совокупности в проявлении жизнедеятельности отсутствует когерентность, поэтому и наблюдается такой вид записи. Путем Фурье анализа в спектральном составе биоритмов, показанных на рис. 10, выявлен набор длиннопериодных вариаций ДП. Общим периодом для обоих биологических видов оказалась временная продолжительность в 27 с. Возможно, что этот временной интервал универсален и является некоей постоянной для всех живых систем.

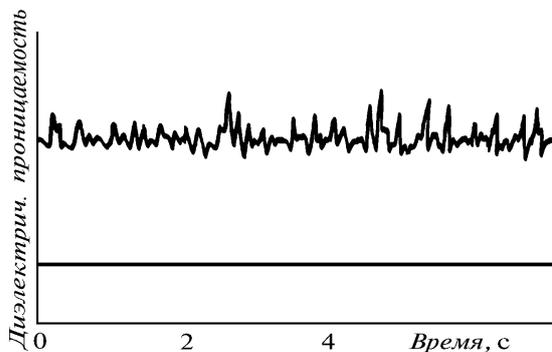


Рис. 9. Спектр флуктуаций диэлектрической проницаемости в опытах *in vitro*

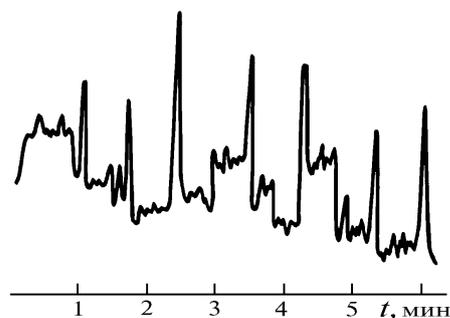


Рис. 10. Биоритмы *blattella germanica* в опыте *in vivo*

После регистрации сигналов жизнедеятельности возник вопрос об оценке чувствительности перечисленных объектов на внешнее, причем слабое возмущение. Были проведены опыты с падающим на образец по световоду слабым световым потоком. Интенсивность кратковременного потока составляла  $0,2 \text{ мВт/см}^2$ . Во всех экспериментах наблюдались стимулированные светом индукционные сигналы ДП. Эти сигналы характеризуют динамические процессы, которые происходят в системе электрических зарядов после возбуждения светом. Объекты, помещенные в измерительный резонатор, облучались либо когерентным, либо некогерентным светом. В качестве источника когерентного света использовался гелий-неоновый лазер, некогерентного – лампочка накаливания. На рис. 11 приведены сигналы свободной индукции и эха после одноимпульсной, а на рис. 12 такие же сигналы после двухимпульсной подсветки. В последнем случае наблюдается двухимпульсное эхо. Перечислим основные признаки этих сигналов.

а. Не обнаружена закономерность спада сигнала эха по известному соотношению  $A_3 \sim A_0 \exp(-m\tau/T_2)$ , где  $m$  – коэффициент;  $\tau$  – интервал между импульсами подсветок, а  $T_2$  – характеристическое для электрических зарядов время.

б. Временной интервал, в течение которого наблюдается сигнал двухимпульсного эха, достигает нескольких минут.

в. Амплитуда и форма сигналов эха явно не зависят от длительности светового возбуждения.

г. Наблюдается некоторое несовпадение момента появления двухимпульсного эхосигнала с временным интервалом в  $2\tau$ , присущим для известных типов эхоявлений.

д. Огибающая спада сигнала свободной индукции и форма эха имеют сложный вид.

е. Из сравнения данных с когерентным и некогерентным световым облучением не обнаружено заметного отличия по интенсивности, длительности и форме огибающей сигнала.

На основании последнего признака можно сделать вывод, что передний и задний фронты подсветок приводят к возникновению одноимпульсного эха и являются <спусковым устройством> для быстрого переброса электрона из одного состояния в другое. Каждый такой переключатель электрона сопровождается медленными конформационными переходами. Таким образом, нелинейные свойства, приводящие к генерации описываемых сигналов, оказываются заложенными в электронно-конформационных взаимодействиях в макромолекуле. Можно было бы предположить другой механизм, объясняющий природу сигналов, например, в виде распространения возбуждения по нервным волокнам – аксонам. Однако в этом случае трудно объяснить достаточно длинные времена переходных процессов, достигающие нескольких ми-

нут, и то, что такие же сигналы обнаружены в экспериментах *in vitro* с красными и зелеными одноклеточными водорослями, а также дрожжевыми клетками.

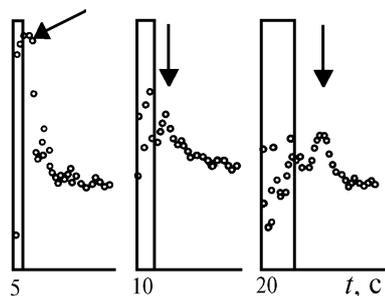


Рис. 11. Сигналы индукции и одноимпульсного эха диэлектрической проницаемости (показано стрелками), стимулированные световым потоком слабой интенсивности. Объект *blattella germanica*

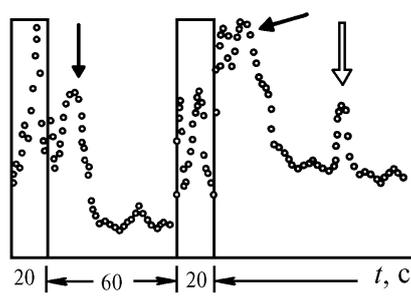


Рис. 12. Одноимпульсный и двухимпульсный эхо-сигналы диэлектрической проницаемости

Перечисленные свойства позволяют сделать заключение о том, что в биологической системе, в особенности живой, даже при таких слабых уровнях внешнего возмущения обнаруживаются нелинейные свойства. Поэтому данные системы, по нашему мнению, в сочетании с совершенными радиотехническими средствами могут быть весьма чувствительным детектором слабых возмущений различного происхождения.

## 7. Биологический детектор для регистрации слабых космофизических полей

В качестве чувствительного детектора слабых сигналов космического или любого другого происхождения могут быть биологические объекты. Имеется большое число достоверных сведений о прямом воздействии всевозможных полей на живую систему и ответной ее реакции. Эта реакция может иметь различную природу, однако важно знать, в какие физические сигналы она переводится и каким образом наиболее эффективно с помощью электронной техники ее регистрировать.

Предлагается для обсуждения детектор, состоящий из упомянутого выше измерителя ДП и активного элемента. Мы нашли, что наиболее удобным биологически активным элементом может быть *blattella germanica*. Это связано с тем, что, во-первых, объект легко доступен, во-вторых, что в длительном измерительном процессе важным фактором оказывается его живучесть.

Показателем работоспособности детектора можно считать регистрацию полного лунного затмения. Это событие на Дальнем Востоке произошло 10 февраля 1990 г. На рис. 13 показана запись всего хода лунного затмения. Выбросы на колоколообразной кривой соответствуют тем же осцилляциям, которые приведены на рис. 10. Пока остается открытым вопрос о процессах, происходящих в активном элементе биологического детектора в результате воздействия таких природных явлений, как лунное затмение. Гипотетически можно предположить, что действие изменяющегося гравитационного поля Земли проявляется в виде перераспределения зарядовой плотности в макромолекулах организма.

Детальные расчеты по чувствительности детектора можно выполнить на основании клеточной модели живого организма, предложенной Х. Фрелихом [30]. Согласно идеям Фрелиха электрические взаимодействия играют большую роль в процессах жизни. Они реализуются посредством электрических диполей в мембранах живых клеток, которые под действием метаболического возбуждения могут стать активными и управлять процессами синтеза и деления клеток. В дальнейшем эта модель была развита путем привлечения спонтанных лавинных процессов, которые происходят в живых клетках под действием метаболической накачки. При таком подходе макромолекулы в мембранах приобретают электрические дипольные моменты в результате лавинного процесса, при котором расходуется потенциальная метаболическая энергия.

Процессы, которые при этом реализуются совместно с макроскопическими движениями, обусловлены колебаниями специфической структуры биологических резонаторов, вызывающих необходимые жизненные функции организма. После окончания очередного процесса макромолекулы теряют свою активность до следующего акта возбуждения. Ритмы этих процессов задаются частотой дыхания, природными и солнечными колебаниями. Сами по себе

лавинные процессы тоже обладают своими динамическими параметрами, которые могут быть изменены внешним возмущением. Таким образом, имеются важные элементы динамики живых систем, достаточно изученных для их использования в детекторах.

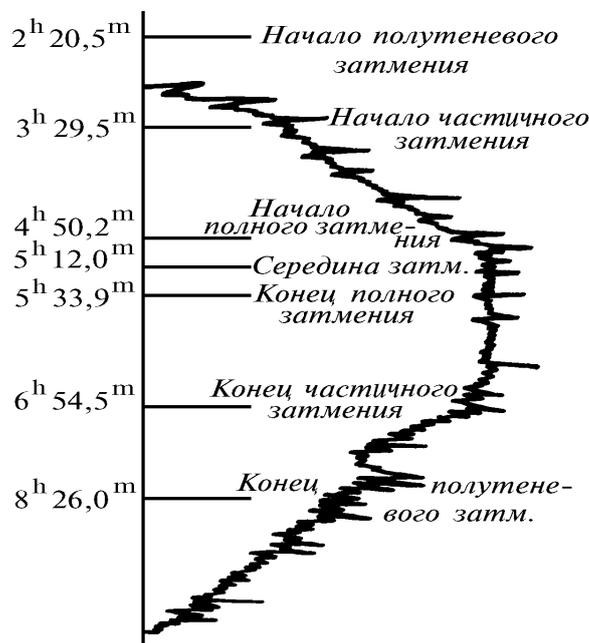


Рис. 13. Регистрация лунного затмения посредством измерения диэлектрической проницаемости биологического детектора. В качестве активного элемента использован *blattella germanica*

Мы не ограничились единичным испытанием детектора. Он был использован во время частичного солнечного затмения. Явление наблюдалось 10 июля 1991 г. Полное затмение наблюдалось на территории Мексики. В настоящее время полученные данные обрабатываются, однако первичные данные подтверждают результаты по лунному затмению [31, 32].

В заключение хочется отметить, что в этой статье мы описали результаты совместных экспериментальных работ и попытались это сделать, не вдаваясь в строгие математические формулировки описанных здесь процессов. Это связано прежде всего с тем, что мы не имели желания перегружать материал <сухой> математикой, в противном случае объем мог бы оказаться утомительным даже для самого терпеливого читателя. И кроме того, эксперимент всегда можно повторить заново, а для этого не нужны математические нагромождения.

1. Grischkowsky D., Hartmann S.R. // Phys. Rev. Lett. 1968. V. 20. N 2. P.41–43.
2. Копвиллем У.Х., Осипов В.Н., Смоляков Б.П., Шарипов Р.З. // УФН. 1971. Т. 105. С. 767–769.
3. Копвиллем У.Х. // УФЖ. 1976. Т.21. N 7. С. 1215–1217.
4. Копвиллем У.Х. // ЖЭТФ. 1962. Т.42. N 5. С. 1333–1343.
5. Копвиллем У.Х., Смоляков Б.П., Шарипов Р.З. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1973. Т. 37. С. 2240–2243.
6. Асадуллин Я.Я., Копвиллем У.Х., Осипов В.Н. и др. // ФТТ. 1971. Т. 13. С. 2784–2786.
7. Копвиллем У.Х., Смоляков Б.П., Шарипов Р.З. // Письма в ЖЭТФ. 1971. Т. 13. С. 558–560.
8. Смоляков Б.П., Ангерт Н.Б., Копвиллем У.Х., Шарипов Р.З. // ФТТ. 1973. Т. 15. С. 559–561.
9. Смоляков Б.П., Самарцев В.В., Шарипов Р.З., Белабаев К.Г. // Тр. 6 Межд. Симпоз. по нелинейной акустике. М. 1975. 8–10 июля. Ч. 2. С. 185–198.
10. Currie I.E., Krumhansl T.A., Bishop A.R., Trullinger S.F. // Phys.Rev.B. 1980. V. 22. N 2. P. 477–497.
11. Kopvillem U.Kh., Smoljakov B.P., Sharipov R.Z. // Phys.Lett.A. 1973. P. 1550–1554.
12. Alekseev A.V., Kholodkevish E.D., Kopvillem U.Kh., Sharipov R.Z. // Abstr. 8. Intern. Sumpos. Acoustics. Univ. of Leeds. UK. 1981. P. 3.
13. Бабанов Ю.Е., Зверев С.Б., Копвиллем У.Х. // Тез. докл. Всесоюзн. конф. по магнитному резонансу. Казань. 1984. 20–22 июня. Ч. 3. С. 73.

14. Салихов К.М., Семенов А.Г., Цветков Ю.Д. // Электронное спиновое эхо и его применение. Новосибирск: Наука, 1976. 342 С.
15. Копвиллем У.Х., Смоляков Б.П., Шарипов Р.З. // ФТТ. 1972. Т.14. В.5. С. 1444–1447.
16. Копвиллем У.Х., Смоляков Б.П., Хаиров Р.Ф., Шарипов Р.З. // Радиоспектроскопия. 1974. N 8. С. 3–7.
17. Самарцев В.В., Смоляков Б.П., Хаиров Р.Ф., Шарипов Р.З. // Акустический парамагнитный резонанс. Казань. 1975. С. 97–122.
18. Копвиллем У.Х., Нагибаров В.Р. // ЖЭТФ. 1968. Т. 54. С. 312–316.
19. Каменев С.Е., Копвиллем У.Х., Пасынков А.С., Шарипов Р.З. // Биофизика. 1981. Т. 26. С. 1054–1051.
20. Каменев С.Е., Копвиллем У.Х., Пасынков А.С., Шарипов Р.З. // УФЖ. 1981. Т. 26. N 11. С. 1911–1913.
21. Pasyнков А.С., Kopyllem U.Kh., Sharipov R.Z. // Studia Biophysica. 1984. V. 103. N 3. P. 225–229.
22. Gittleman J.T., Goldstein Y., Bozowski S. // Phys. Rev. 1972. V. 1. P. 3609–3617.
23. Шарипов Р.З., Бурундуков А.С. // Тез. докл. межд. шк. по магнитному резонансу. Новосибирск, 1987. 20–26 сент. С. 76.
24. Шарипов Р.З., Бурундуков А.С. // Тез. докл. Всесоюз. конф. по применению магнитного резонанса в народном хозяйстве. Казань, 1988. 22–24 июня. С. 112.
25. Sharipov R.Z., Burundukoff A.S. // Abstr. 24-th Congress Ampere and Related Phenomena. Poznan. 1988. P. 38.
26. Kopyllem U.Kh., Sharipov R.Z., Burundukoff A.S. // Abstr. Intern. Society of Magn. Res. 10-th Meeting Morine France. 1989. P. 6.
27. Kopyllem U.Kh., Sharipov R.Z. // Abstr. The 1-th Soviet-Chinese Simpos on Okeanography. Vladivostok. 1990. P. 76.
28. Копвиллем У.Х., Шарипов Р.З. // Тр. 4 Всесоюз. симпоз. по атмосф. электр-ву. Нальчик, 1990. 7–11 окт. С. 51–52.
29. Paul R., Tuszunski V.A., Chatterju R. // Phys.Rev. A. 1984. V. 30. P. 2676–2685.
30. Копвиллем У.Х., Шарипов Р.З. // Гравитационные волны и гравитационная энергия; Тр. II симпоз. 26–28 мая. 1989. ОИЯИ. Дубна, 1990. С. 93–100.
31. Копвиллем У.Х., Шарипов Р.З. // Гравитационные волны и гравитационная энергия; Тр. III симпоз. 18–20 мая. 1990. ОИЯИ. Дубна, 1991. С. 62–69.
32. Kopyllem U.Kh., Sharipov R.Z. // Abstr. 12-th Intern. Conf. on Raman Spectr. South Carolina. USA. 1990. 13–17 Aug. P. 1–2.

Тихоокеанский океанологический институт  
Дальневосточного отделения РАН

Поступила в редакцию  
18 марта 1993 г.

U.Kh. Kopyllem, R.Z. Sharipov. **Coherence Phenomena for Microwave, Acoustic, Electromagnetic, and Electric Fields in Media and Samples of Different Nature.**

An overview of experimental studies on the microwave, acoustic, magnetic and electric echo-phenomena in crystal and amorphous structures is proposed. Some results obtained using electron paramagnetic resonance to study the processes of self-arrangement of some primitive living systems are presented. A possibility of recording underwater landscape from the dynamics of the dielectric constant of the near water atmospheric layer is reported. Signals of free induction and echos of the dielectric permittivity caused by light pulses of low intensity detected in biological objects are discussed. The latest results of the studies in this direction obtained by the authors are also presented in the paper.