



## ЭФФЕКТЫ ВЛИЯНИЯ НИЗКОЧАСТОТНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ФИЗИОЛОГИЧЕСКОГО ТРЕМОРА

*О.Н. Павлова, А.Н. Тупицын, А.Н. Павлов*

На основе техники вейвлет-анализа проведено исследование изменений характеристик физиологического тремора при воздействии слабого низкочастотного магнитного поля. Рассмотрены различные возможности анализа структуры экспериментальных данных с помощью действительных и комплексных базисных функций вейвлет-преобразования. Обнаружено, что магнитное поле оказывает влияние на локальную регулярность исследуемых процессов и на их энергетические характеристики.

### Введение

В повседневной жизни человек постоянно встречается с различными источниками низкочастотного магнитного поля, такими как домашние электрические приборы, линии электропередачи или бытовая электропроводка. Сотрудники электрических компаний, например, регулярно работают в непосредственной близости от оборудования, которое генерирует магнитные поля от нескольких единиц до нескольких сотен мкТл [9]. При использовании бытовой техники (электробритва, фен и т.п.) магнитные поля, создаваемые этими приборами, могут достигать 1500-2000 мкТл [2]. Реакции организма на наличие магнитных полей характеризуются разнообразием и неустойчивостью. Это в значительной степени определяется большими различиями индивидуальной чувствительности к ним как организма в целом, так и отдельных его систем. Направленность реакции на воздействие магнитного поля зависит от исходного состояния организма и его важнейших функциональных систем. Например, воздействие на фоне повышенной функции приводит к ее снижению, а в условиях угнетения функции сопровождается ее повышением. С этих позиций действие слабого магнитного поля может рассматриваться как нормализующее. Наиболее чувствительной к наличию магнитного поля считается центральная нервная система, прежде всего гипоталамус, таламус, кора головного мозга [3]. Под влиянием магнитного поля изменяется условно-рефлекторная деятельность мозга с преимущественным развитием тормозных процессов в центральной нервной системе, что оказывает благоприятное влияние на сон, уменьшение эмоционального напряжения. Эти обстоятельства являются причиной использования магнитных полей в терапевтических

целях. В частности, при магнитотерапии понижается чувствительность периферических рецепторов и улучшается функция проводимости. Следствием первого можно считать обезболивающее действие магнитного поля, следствием второго – благоприятное влияние на восстановление функций травмированных периферических нервов. В то же время длительное воздействие сильных высокочастотных магнитных полей оказывает негативное влияние на центральную нервную систему, приводя к повышенной утомляемости, головным болям и т.п. В зависимости от частоты и напряженности магнитного поля в коре больших полушарий мозга могут развиваться процессы торможения и возбуждения, происходить изменения суммации возбуждения в нервных клетках головного и спинного мозга [3].

Эффекты воздействия полей с малым значением индукции (до 2000 мкТл) на центральную и периферическую нервную систему человека до сих пор остаются малоизученными. Главная причина этого состоит в сложности их анализа на основе классических нейрофизиологических данных, таких как электроэнцефалограмма или вызванные потенциалы. Экспериментальные записи электрической активности мозга «загрязняются» самим магнитным полем [4], что очень затрудняет выявление возможных изменений нейрофизиологических параметров. Одна из возможностей обойти данную проблему состоит в косвенном изучении эффектов влияния поля на моторные функции, которые являются индикаторами функционирования нервной системы человека [5, 6], в частности, на характеристики физиологического тремора.

Тремор представляет собой произвольные, нерегулярные и непрерывные движения конечностей тела и характеризуется амплитудой (обычно очень малой и различающейся у разных людей) и частотой, составляющей примерно 8-12 Гц [7]. Известно, что физиологический тремор чувствителен более чем к 30 различным факторам [6], в том числе и к влиянию центральной нервной системы. Это влияние в значительной степени зависит от состояния человека и условий окружающей среды, однако механизмы, лежащие в его основе, еще недостаточно хорошо установлены [8]. Тремор можно наблюдать, например, когда человек старается держать неподвижными пальцы вытянутых рук. Эффекты влияния слабого магнитного поля (1000 мкТл, 50 Гц), генерируемого на уровне головы человека, на характеристики физиологического тремора изучались в работе [9] с помощью стандартного аппарата статистического анализа экспериментальных данных. Нами исследованы изменения характеристик тремора при включении переменного магнитного поля с помощью техники вейвлет-анализа, представляющей собой наиболее мощный в настоящее время инструмент исследования структуры нестационарных процессов [10, 11].

## 1. Эксперименты

Эксперименты по исследованию влияния низкочастотного магнитного поля на характеристики физиологического тремора проводились на добровольцах из числа сотрудников французской компании «Electricité De France», соответствующие экспериментальные данные были предоставлены нам коллегами из университета г. Бордо. В исследованиях принимали участие 24 человека в возрасте от 20 до 50 лет. Все участники проходили предварительный медицинский осмотр в своей компании для того, чтобы удостовериться, что они не имеют хронических заболеваний сердечно-

сосудистой или нервной системы. Эксперименты проводились в одно и то же время суток при одинаковой комнатной температуре. Испытуемые садились на стул, расположенный в центре специальной установки, генерирующей переменное магнитное поле 1000 мкТл, 50 Гц на уровне головы человека. Установка была экранирована от внешних магнитных полей. Правая рука испытуемого помещалась на подлокотник ладонью к полу. На ногте указательного пальца был закреплен маленький кусочек белого картона, а над кусочком картона на высоте 8 см располагался лазерный датчик LM10 (серия ARN12, Япония), являющийся одновременно и излучателем (лазер) и приемником, на вход которого поступает отраженный от объекта лазерный луч. Специальная конструкция асферических линз обеспечивала высокое качество измерения. В первую очередь, это относилось к высокой степени линейности характеристики измерителя. Лазерный датчик позволял записывать вертикальные перемещения пальца с разрешением 5 мкм и оцифровкой по времени 5 мс. Впереди испытуемого находился осциллограф, который демонстрировал развертку траектории движения указательного пальца и горизонтальную линию, которая отмечала «рекомендуемое» расположение указательного пальца. Поскольку эксперимент длился долго, испытуемый мог в процессе сместить руку. Осциллограф был нужен для того, чтобы контролировать эти смещения. На участников исследования надевали антишумовые шлемы для изоляции от окружающего шума. В ходе каждого эксперимента (длительностью 65 минут) проводились две последовательности измерений. Первая из них («real») содержала два включения и два выключения магнитного поля, то есть по два перехода «on/off» и «off/on» (рис. 1, *a*). Вторая последовательность («sham») являлась тестовой – испытуемый считал, что она ничем не отличается от первой, но на самом деле магнитное поле при переходе «off/on» не включалось. Ход эксперимента управлялся компьютером, и испытуемый не знал, присутствует ли поле на самом деле или нет. Это делалось для того, чтобы выявить возможные изменения характеристик тремора, обусловленные непосредственно влиянием магнитного поля.

Для анализа выбирались временные зависимости мгновенной скорости движения указательного пальца, которые были получены путем дифференцирования записей значений координаты его вертикального перемещения. Выбор данных сигналов был обусловлен несколькими причинами. Во-первых, временной ряд вертикального перемещения является сильно нестационарным, поскольку указательный палец не фиксируется, и испытуемый может совершать его произвольные перемещения, которые оказываются очень существенными по сравнению с амплитудой тремора.

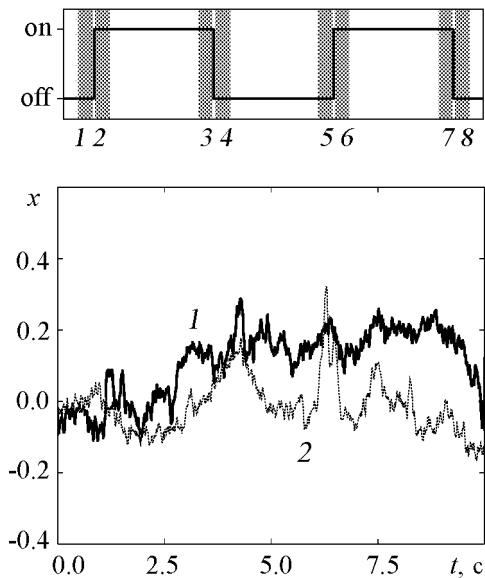


Рис. 1. *a* – экспериментальная последовательность, содержащая два включения и два выключения магнитного поля; *b* – примеры экспериментальных данных, соответствующих состояниям 2 и 4

С точки зрения техники вейвлет-анализа, используемого в настоящей работе, данная нестационарность не является принципиальным моментом и, фактически, просто фильтруется, однако для стандартных методов обработки данных (анализ амплитудных характеристик и т.п.) использование временного ряда вертикального перемещения способно приводить к некорректной интерпретации результатов. Во-вторых, в известных нам работах по исследованию характеристик тремора (например, [3, 9]) исследовалась именно структура временного ряда скорости вертикального перемещения. В целях сопоставления полученных результатов с результатами аналогичных работ по данной тематике нам представляется целесообразным проведение исследований на сигналах одной и той же структуры. Для дифференцирования зашумленного сигнала рассматривался подход, хорошо зарекомендовавший себя в ранее проводимых нами исследованиях [12], а именно, производная в данной точке оценивалась с помощью метода наименьших квадратов по нескольким ближайшим соседям. Более детальное описание приводится, в частности, в [12].

Наличие магнитного поля приводило к появлению артефактов на частоте 50 Гц. Поскольку тремор соответствует диапазону меньших частот, проводилась предварительная фильтрация данных с помощью полосового фильтра, устраняющего динамику выше 40 Гц (высокочастотный шум) и ниже 2 Гц (медленная нестационарность или тренд).

## 2. Вейвлет-анализ

Исследования характеристик физиологического тремора при воздействии переменного низкочастотного магнитного поля проводились в работе [9] на основе стандартных методов статистической обработки сигналов мгновенной скорости движения указательного пальца, включая вычисление амплитуды и частоты, различных характеристик функции плотности распределения и энергии в разных частотных диапазонах. Эти характеристики не выявили значительных изменений в структуре сигналов для переходов «on/off» и «off/on». Учитывая, что речь идет о слабых магнитных полях, отсутствие существенных различий не является неожиданным результатом – если происходят изменения характеристик тремора, то они будут небольшими. В то же время необходимо отметить, что анализируемые данные являются нестационарными (рис. 1, б), что снижает достоверность оценок статистических характеристик, приводя, в частности, к «расплыванию» функции плотности распределения, уменьшению надежности расчета амплитуды и т.д. Для исследования нестационарных процессов в динамике живых систем целесообразно применять специальные методы, эффективность которых не зависит от свойства стационарности анализируемых сигналов. Наиболее универсальным методом исследования структуры нестационарных данных в настоящее время является вейвлет-анализ [10, 11].

Вейвлет-преобразование сигнала  $x(t)$  имеет следующий вид:

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt. \quad (1)$$

Здесь  $W(a, b)$  – коэффициенты преобразования,  $\psi$  – базисная функция (вейвлет),  $a$  – масштаб наблюдения,  $b$  – параметр смещения вдоль оси времени, символом «\*» обо-

значена операция комплексного сопряжения. Выбор функции  $\psi$  определяется целями исследования. Каждая функция имеет свои особенности во временной и в частотной областях, поэтому с помощью разных функций можно лучше выявить те или иные свойства рассматриваемого процесса.

**2.1. Анализ на основе действительных базисных функций.** Некоторые особенности сигнала  $x(t)$  не зависят от выбора базисной функции  $\psi$ , в частности, локальная регулярность, анализ которой осуществляется в рамках концепции мультифрактального формализма [13, 14]. Данный анализ проводится с помощью действительных вейвлетов, сконструированных, например, на основе производных функции Гаусса

$$\psi^{(m)}(\tau) = (-1)^m \frac{\partial^m}{\partial \tau^m} \left[ \exp\left(-\frac{\tau^2}{2}\right) \right]. \quad (2)$$

Результатом преобразования (1) является поверхность в 3-мерном пространстве. Ее визуализация часто проводится в виде проекции на плоскость  $(a, b)$ , в которой разные значения коэффициентов  $W(a, b)$  изображаются разными оттенками цвета. Считается, что наиболее важная информация об этой поверхности содержится в скелетоне – линиях локальных экстремумов вейвлет-коэффициентов  $W(a, b)$ , которые можно выявить, фиксируя масштаб  $a$  и двигаясь вдоль параметра  $b$ . В результате получается множество линий разной длины: одни из них обрываются на малых масштабах, другие являются значительно более длинными (рис. 2). Каждая из линий при  $a \rightarrow 0$  выходит из точки, в которой исходный сигнал имеет какую-то особенность (сингулярное поведение). Статистический анализ сингулярностей нестационарных процессов проводится с помощью метода максимумов модулей вейвлет-преобразования (ММВП) [14]. Детали данного подхода и особенности его применения к экспериментальным данным можно найти в работах [15].

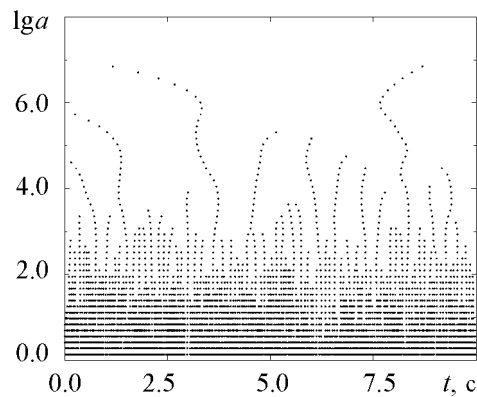


Рис. 2. Характерный вид скелетона, вычисленного для одного из сигналов, изображенных на рис. 1,б

Основная идея метода ММВП состоит в следующем. После выделения скелетона осуществляется построение частичных функций по формуле

$$Z(q, a) = \sum_{l \in L(a)} |W(a, b_l(a))|^q, \quad (3)$$

где  $L(a)$  – множество всех линий ( $l$ ) максимумов модулей вейвлет-коэффициентов, существующих на масштабе  $a$ . Значение  $b_l(a)$  характеризует расположение на этом масштабе максимума, относящегося к линии  $l$ . Для частичных сумм выполняется степенная зависимость вида

$$Z(q, a) \sim a^{\tau(q)}, \quad (4)$$

в которой показатели степени  $\tau(q)$  называют скейлинговыми экспонентами. Статистический анализ сингулярного поведения процесса  $x(t)$  осуществляется в терминах экспонент Хелдера  $h(q) = d\tau(q)/dq$  и спектра сингулярностей  $D(h) = qh - \tau(q)$ . Более подробное описание данных характеристик и метода ММВП приводится в [14]. Отметим, что значения экспонент Хелдера характеризуют наличие корреляций разной длительности в анализируемом процессе, например, антикоррелированную ( $h < 0.5$ ) и коррелированную динамику ( $h > 0.5$ ), отсутствие корреляций ( $h = 0.5$ ), а также соответствие сигнала  $x(t)$  по своим статистическим свойствам известным примерам случайных процессов – (1/f)-шуму ( $h = 1$ ), броуновскому движению ( $h = 1.5$ ) и т.д. Частичные функции  $Z(q, a)$  при  $q < 0$  характеризуют степенные закономерности вида (2) для слабых сингулярностей (малых флуктуаций в анализируемом процессе), а при  $q > 0$  – для сильных сингулярностей (больших флуктуаций).

**2.2. Анализ на основе комплексных базисных функций.** Спектральный анализ нестационарных процессов в настоящее время обычно проводится на основе вейвлет-преобразования с использованием комплексных базисных функций [16]. Преимущества данного подхода по сравнению с классическим спектральным анализом, базирующемся на финитном преобразовании Фурье, неоднократно обсуждались в печати. Если исследователя интересует только факт наличия каких-либо периодических составляющих в анализируемом процессе, то для их выявления можно использовать классические методы. Если же необходимо получить информацию о временной эволюции ритмических компонент и изменении структуры сигнала во времени, то вейвлеты, несомненно, оказываются предпочтительнее.

Наиболее популярной комплексной базисной функцией является вейвлет Морле, формулу которого упрощенно можно записать следующим образом:

$$\psi(\tau) = \pi^{-1/4} \exp(j2\pi f_0\tau) \exp\left[-\frac{\tau^2}{2}\right]. \quad (5)$$

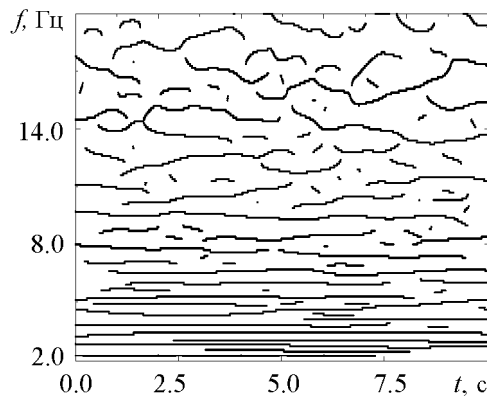


Рис. 3. Частотно-временной спектр, иллюстрирующий сложную структуру спектральных линий в анализируемом процессе

энергетическим спектром. Наиболее важная информация об этой поверхности содержится в поведении локальных максимумов, то есть во временной эволюции мгновен-

Преобразование (1) представляет собой двумерное разложение скалярного сигнала, при котором частота  $f = f_0/a$  и время, определяющееся величиной параметра  $b$ , интерпретируются как независимые переменные. В отличие от случая действительных базисных функций при проведении спектрального анализа с помощью вейвлета (5) вместо коэффициентов  $W(a, b)$  обычно анализируют плотность энергии  $E(f, b) = |W(f, b)|^2$ . Плотность энергии также представляет собой поверхность в 3-мерном пространстве, сечения которой в фиксированные моменты времени соответствуют локальным

ных частот характерных ритмов. Их выделение проводится по аналогии с выделением скелетона в разделе 2.1, однако различие состоит в том, что теперь фиксируется параметр  $b$ , и поиск локальных максимумов поверхности  $E(f, b)$  (пиков локальных энергетических спектров) осуществляется при движении вдоль параметра масштаба  $a$  (или частоты  $f = f_0/a$ ). В результате данной процедуры в каждый момент времени регистрируются значения мгновенных частот всех ритмов, присутствующих в анализируемом процессе (рис. 3).

Наряду с локальными энергетическими спектрами через плотность энергии вычисляется еще ряд характеристик, в частности, мера локальной перемежаемости (локальных отклонений от среднего значения на каждом масштабе), характеризующая степень неравномерности распределения энергии [16]

$$I(f, b) = \frac{E(f, b)}{\langle E(f, b) \rangle}. \quad (6)$$

Здесь угловыми скобками обозначена операция усреднения по времени, то есть по параметру  $b$ . В качестве количественной характеристики неравномерности распределения энергии для каждой частоты  $f$  можно вычислить величину стандартного отклонения меры  $I(f, b)$  от среднего значения  $\langle I(f, b) \rangle = 1$ . Для сложных шумоподобных процессов, изображенных на рис. 1,  $b$ , имеет смысл провести дополнительное усреднение в пределах некоторого частотного окна, которое позволит сгладить сильные вариации данной характеристики.

### 3. Результаты

**3.1. Анализ локальной регулярности с помощью действительных вейвлетов.** Учитывая способность живых организмов к адаптации, исследование возможных изменений в характеристиках физиологического тремора проводилось на небольших интервалах времени сразу после включения поля (состояния 2 и 6 на рис. 1,  $a$ ) по сравнению с динамикой при выключенном поле (состояния 4 и 8). Как отмечается в работе [9], зафиксировать эффекты воздействия магнитного поля можно по первым 10 секундам экспериментальной записи после переходов «off/on» и «on/off». Этот диапазон времени соответствует переходной динамике, то есть нестационарному процессу, что обуславливает необходимость применения специальных методов анализа структуры сигналов.

На рис. 4 приведены результаты, демонстрирующие изменения характеристик тремора при наличии магнитного поля. Они свидетельствуют об изменении локальной регулярности сигналов и корреляционных свойств. В данном случае в отсутствие поля временная зависимость мгновенной скорости движения указательного пальца представляет собой неоднородный случайный процесс, близкий по статистическим характеристикам к нормальному броуновскому движению на малых масштабах и к  $(1/f)$ -шуму на больших. Включения поля приводят к увеличению значений экспонент Хелдера (рис. 4,  $a$ ) и соответствующему смещению спектра сингулярностей (рис. 4,  $b$ ), что свидетельствует о том, что сигнал становится более «гладким».

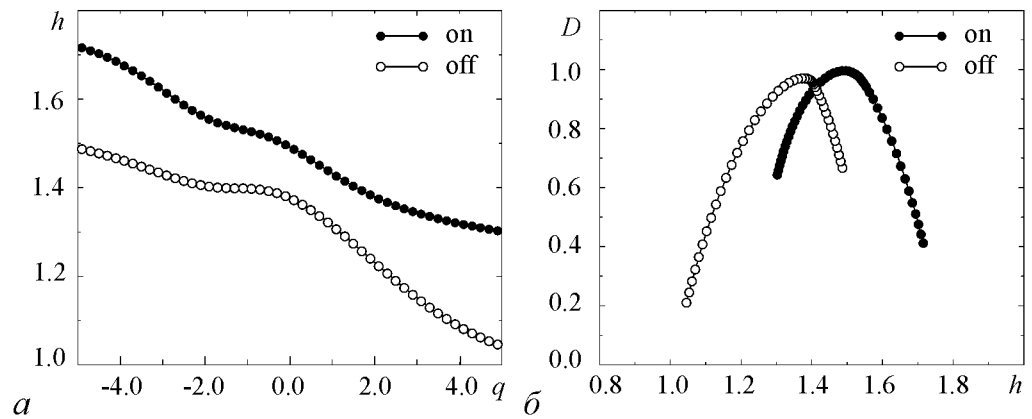


Рис. 4. Пример изменений локальной регулярности сигналов при наличии магнитного поля. Расчеты экспонент Хелдера (а) и спектров сингулярностей (б) приведены для сигналов, изображенных на рис. 1, б

Следует отметить, что характеристики физиологического тремора заметно варьируются у разных людей, в связи с чем необходимо проведение статистического анализа по группе. Несмотря на то, что разброс экспонент Хелдера при этом оказывается достаточно велик, в среднем продемонстрированная тенденция роста значений  $h$  при включении поля сохраняется (рис. 5, черные точки). Таким образом, наличие слабого низкочастотного магнитного поля приводит к незначительному увеличению «гладкости» анализируемых сигналов. Отметим, что в тестовой последовательности («sham»), когда поле не включалось при переходе «off/on» (а испытуемый полагал, что оно присутствует), изменений локальной регулярности сигналов не было зафиксировано (рис. 5, белые точки).

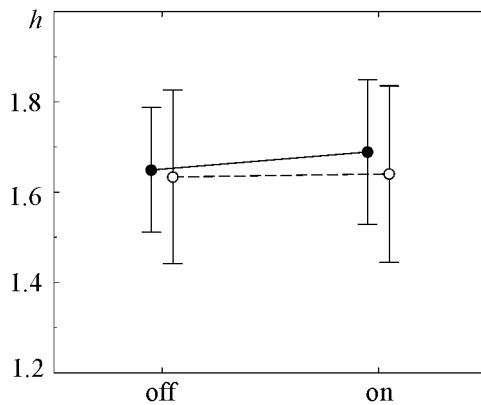


Рис. 5. Статистический анализ изменений локальной регулярности сигналов. Здесь и далее черные точки соответствуют последовательности «real», белые – последовательности «sham». Незначительное увеличение экспонент Хелдера происходит только для первой последовательности

Приведенные результаты статистического анализа получены для базисной функции «WAVE», представляющей собой первую производную функции Гаусса (2), то есть  $m = 1$ . Использование других вейвлетов, например, «МНАТ» ( $m = 2$ ) позволяет сделать аналогичные выводы. Отметим, что достоверное изменение структуры скелетона для состояний «on» и «off», то есть числа линий  $L$  локальных экстремумов (для одного и того же базисного вейвлета) не было обнаружено, существующие различия проявлялись только в скейлинговом поведении частных функций  $Z(q, a)$  и, как следствие, в спектре сингулярностей.

**3.2. Анализ структуры сигналов на основе комплексного базиса.** Использование комплексных вейвлетов позволяет проводить локальный спектральный анализ нестационарных процессов и оценивать глобальный энергетический спектр, который является аналогом классического спектра мощности [16]. Поиск различий в харак-



теристиках физиологического тремора по экспериментальным спектрам проводилась путем вычисления величины средней энергии в разных частотных диапазонах. Такой анализ не позволил выявить достоверные отличия, в связи с чем основное внимание было уделено анализу локальной перемежаемости. С этой целью вейвлет-преобразование проводилось с разрешением по частоте 0.1 Гц,  $f_0 = 5$  Гц. Стандартное отклонение ( $\sigma_I$ ) меры  $I(f, b)$  оценивалось внутри частотного окна шириной 2 Гц, центр которого перемещался в диапазоне от 3 до 15 Гц. Это позволило уменьшить сильные вариации оцениваемой величины, получив достаточно гладкие зависимости  $\sigma_I$  от частоты (рис. 6, а). Как видно из данного рисунка, при включенном поле наблюдается незначительное уменьшение неравномерности распределения энергии, характеризующее слабо выраженный эффект перехода к более упорядоченной динамике.

Так же, как и при расчете экспонент Хелдера, результаты вычисления  $\sigma_I$  значительно варьируются для разных экспериментальных данных (рис. 6, б). Тем не менее можно отметить, что эффект уменьшения неравномерности распределения энергии наблюдается при включенном магнитном поле (последовательность «real») и отсутствует в случае, когда поле не включалось при переходе «off/on» (последовательность «sham»). Для оценки значимости изменений характеристик тремора, обусловленных включением поля, нами был проведен статистический дисперсионный анализ (ANOVA). В частности, при исследовании характеристик локальной перемежаемости (последовательность «real») для уровня значимости  $p = 0.05$  получено значение статистического критерия Фишера  $F = 3.92$ , позволяющее сделать вывод о том, что наблюдаемые изменения характеристик можно считать значительными (то есть эти изменения продиктованы не случайными причинами или погрешностями, а влиянием магнитного поля). Для тестовой последовательности «sham» достоверные изменения не наблюдаются ( $F = 1.2$ ).

Еще одним вариантом изменения динамики может служить появление дополнительных спектральных пиков в частотно-временных спектрах (см. рис. 3). Увеличение числа точек на этом рисунке может иметь разную интерпретацию. Оно может свидетельствовать либо о появлении новых спектральных компонент, либо

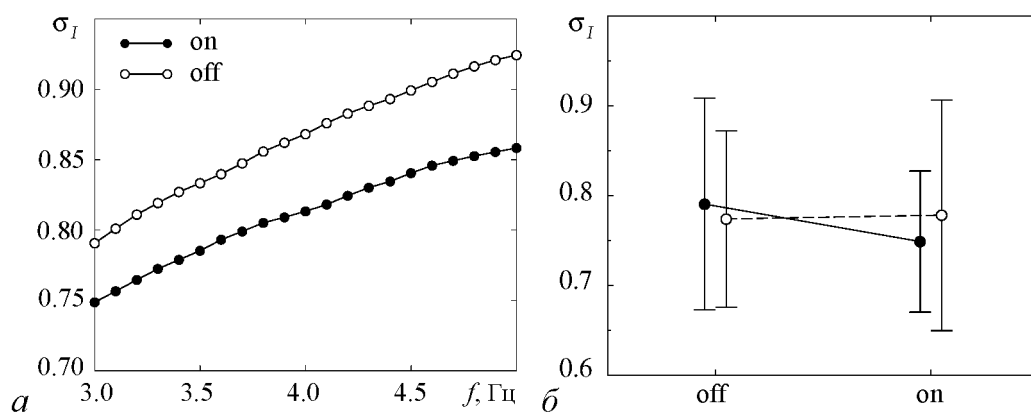


Рис. 6. Усредненные значения стандартного отклонения меры локальной перемежаемости (а) и результаты статистического анализа (б). Наличие магнитного поля приводит к уменьшению разброса значений  $I(f, b)$ . Соответствующий эффект наблюдается только для экспериментальных последовательностей «real» и отсутствует для тестовых последовательностей «sham»

о большей стабильности существующих спектральных линий (в ситуации, когда какой-нибудь ритм то появляется, то исчезает, его стабилизация будет сопровождаться отсутствием «прерываний», что приводит к увеличению числа локальных пиков частотно-временных спектров). Поэтому соответствующие изменения нельзя однозначно трактовать в терминах увеличения или уменьшения сложности динамики. Более корректно будет говорить о количественной характеристике вейвлет-спектров, позволяющей отслеживать изменения в структуре анализируемых процессов.

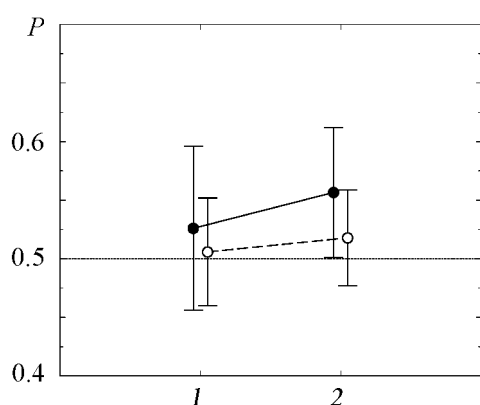


Рис. 7. Изменение вероятности увеличения числа пиков локальных энергетических спектров в состоянии «on» по сравнению с «off» до (1) и после (2) моментов переключения поля

Данная количественная характеристика оценивалась следующим образом. Вначале проводилось вычисление разности числа локальных пиков частотно-временных спектров между состояниями «on» и «off» перед моментами переключения поля в пределах скользящего частотного окна шириной 2 Гц. Путем усреднения по группе определялась вероятность увеличения числа пиков локальных энергетических спектров в состоянии «on» по сравнению с «off». Затем анализировалось, как изменится эта вероятность после моментов переключения поля. Рис. 7 демонстрирует полученные для частотного диапазона 2-5 Гц

результаты. Мы видим, что после переключения поля вероятность увеличивается (см. рис. 7, черные точки). Для последовательности «sham» такой эффект не наблюдается – вычисленные значения близки к 0.5, что отражает отсутствие достоверных различий в структуре вейвлет-спектров между «on» и «off»: примерно в половине случаев число пиков локальных энергетических спектров увеличивается в состоянии «on» по сравнению с «off», в половине – уменьшается (см. рис. 7, белые точки). Соответствующие изменения для последовательности экспериментов «real» являются более четко выраженными.

### Заключение

В данной работе на основе методов вейвлет-анализа было проведено исследование чувствительности характеристик физиологического тремора к воздействию слабого низкочастотного магнитного поля. Влияние сильных полей на моторные функции организма ранее описывалось в научной литературе, однако эффекты, обусловленные полями с малым значением индукции, до сих пор детально не изучались. В связи с этим на данном этапе представляется важным выявить сам факт наличия достоверных изменений характеристик тремора, вызванных магнитным полем, с тем чтобы в дальнейшем обнаруженные эффекты могли получить физиологическую интерпретацию.

Учитывая нестационарный характер анализируемых процессов, исследования проводились на основе методов вейвлет-анализа с различными базисными

функциями как действительными, так и комплексными. Было показано, что слабое магнитное поле приводит к следующим эффектам:

- слабому увеличению локальной регулярности сигналов и, как следствие, к изменению корреляционных свойств анализируемых процессов;
- уменьшению разброса количественных характеристик локальной перемежаемости, то есть более равномерному распределению энергии;
- увеличению количества пиков локальных энергетических спектров в области 2-5 Гц.

Отмеченные эффекты являются весьма незначительными в связи с тем, что воздействующее магнитное поле было слабым. Тем не менее они позволяют говорить о том, что включение магнитного поля действительно находит отражение в характеристиках физиологического тремора.

Полученные результаты позволяют определить ряд перспективных задач, которые могут быть решены после проведения дополнительных экспериментов. В частности, представляет интерес оценить длительности последствий – насколько быстро характеристики тремора возвращаются к исходным значениям после выключения поля. Другой открытый вопрос состоит в оценке величины задержки между моментом включения поля и откликом организма на данное воздействие. Мы надеемся, что эти задачи будут решены в ходе дальнейших исследований.

Авторы благодарят А. Beuter и А. Legros за предоставленные экспериментальные данные, а также О.В. Сосновцеву и Е. Mosekilde за обсуждение результатов и многочисленные дискуссии.

*Проводимые исследования были поддержаны Министерством образования и науки РФ по программе «Развитие научного потенциала высшей школы (2006-2008 гг.)».*

#### **Библиографический список**

1. *Gandhi O.P., Kang G., Wu D., Lazzi G.* Currents induced in anatomic models of the human for uniform and nonuniform power frequency magnetic fields // *Bioelectromagnetics*. 2001. Vol. 22(2). P. 112.
2. *Gauger J.R.* Household appliance magnetic field survey // *IEEE Transactions on Power apparatus and systems*. 1985. Vol. 104. P. 9.
3. *Beuter A., Glass L., Mackey M.C., Titcombe M.S.* *Nonlinear Dynamics in Physiology and Medicine* (Springer-Verlag, New York, 2003).
4. *Cook C.M., Thomas A.W., Prato F.S.* Resting EEG is affected by exposure to a pulsed ELF magnetic field // *Bioelectromagnetics*. 2004. Vol. 25(3). P. 196.
5. *Thomas A.W., Drost D.J., Prato F.S.* Human subjects exposed to a specific pulsed (200 microT) magnetic field: effects on normal standing balance // *Neurosci. Lett*. 2001. Vol. 297. P. 121.
6. *Wachs H., Boshes B.* Tremor studies in normals and in Parkinsonism // *Arch. Neurol*. 1961. Vol. 4. P. 66.
7. *Elble R.J., Koller W.C.* *Tremor*. The John Hopkins University press, London, 1990.

8. *McAuley J.H., Marsden C.D.* Physiological and pathological tremors and rhythmic central motor control // *Brain*. 2000. Vol. 123. P. 1545.
9. *Legros A., Beuter A.* Effect of a low intensity magnetic field on human behavior // *Bioelectromagnetics*. 2006 (in press).
10. *Grossman A., Morlet J.* Decomposition of hardy functions into square integrable wavelets of constant shape // *S.I.A.M. J. Math. Anal.* 1984. Vol. 15. P. 723; *Daubchies I.* Ten lectures on Wavelets. Philadelphie, S.I.A.M., 1992; *Meyer Y. (ed.)* Wavelets and Applications. Springer-Verlag, Berlin, 1992.
11. *Chui C.K.* An Introduction to Wavelets. New York, Academic Press, 1992; *Столниц Э., ДеРоуз Т., Салезин Д.* Вейвлеты в компьютерной графике. Ижевск. НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2002; *Короновский А.А., Храмов А.Е.* Непрерывный вейвлетный анализ. Саратов, изд-во ГосУНЦ «Колледж», 2002.
12. *Janson N.B., Pavlov A.N., Anishchenko V.S.* Global reconstruction: application to biological data and secure communication // Invited chapter in book *Chaos and its reconstruction* / Eds. G.Gouesbet, S.Meunier-Guttin-Cluzel. Novascience publishers, New York, 2003. P. 287.
13. *Mallat S.G.* A Wavelet Tour of Signal Processing. San Diego, Academic Press, 1998.
14. *Muzy J.F., Bacry E., Arneodo A.* The multifractal formalism revisited with wavelets // *Int. J. Bifurcation and Chaos*. 1994. Vol. 4. P. 245.
15. *Muzy J.F., Bacry E., Arneodo A.* Multifractal formalism for fractal signals: the structure-function approach versus the wavelet-transform modulus-maxima method // *Phys. Rev. E*. 1993. Vol. 47. P. 875; *Ivanov P.Ch., Nunes Amaral L.A., Goldberger A.L., Havlin S., Rosenblum M.G., Struzik Z.R., Stanley H.E.* Multifractality in human heartbeat dynamics // *Nature*. 1999. Vol. 399. P. 461; *Павлов А.Н., Зиганшин А.Р., Анищенко В.С.* Мультифрактальный анализ временных рядов // *Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика*. 2001. Т. 9. № 3. С. 39; *Pavlov A.N., Sosnovtseva O.V., Ziganshin A.R., Holstein-Rathlou N.-H., Mosekilde E.* Multiscality in the dynamics of coupled chaotic systems// *Physica A*. 2002. Vol. 316, P. 233.
16. *Астафьева Н.М.* Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // *Успехи физических наук*. 1996. Т. 166. № 11. С. 1145.

*Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского*      *Поступила в редакцию* 8.05.2006  
*После доработки* 1.09.2006

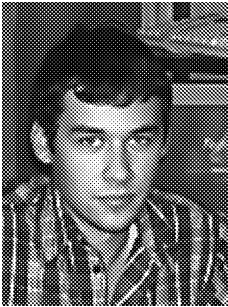
## **INFLUENCE OF LOW-FREQUENCY MAGNETIC FIELD ON CHARACTERISTICS OF PHYSIOLOGICAL TREMOR**

*O.N. Pavlova, A.N. Tupitsyn, A.N. Pavlov*

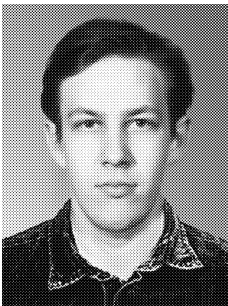
Based on the wavelet-analysis technique, a study is performed of how characteristics of physiological tremor are changed at the influence of a weak low-frequency magnetic field. Different approaches to analyze the structure of experimental data are considered using both, real and complex wavelet-transform basic functions. It is shown that magnetic field has an effect on a local regularity of analyzed processes and on their energy characteristics.



*Павлова Ольга Николаевна* – студентка 5-го курса факультета нелинейных процессов и нелинейной динамики Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского (кафедра радиофизики и нелинейной динамики, специальность «биохимическая физика»). Область научных интересов – применение методов нелинейной динамики в исследованиях биологических систем. Имеет 3 научные публикации.



*Тутцын Анатолий Николаевич* – родился в Саратове (1983). Окончил Саратовский государственный университет по специальности «биохимическая физика» (2005). В настоящее время аспирант кафедры радиофизики и нелинейной динамики СГУ. Область научных интересов: нелинейная динамика, анализ временных рядов.



*Павлов Алексей Николаевич* – родился в Саратове (1973). Окончил физический факультет Саратовского университета по специальности радиофизика и электроника (1995). Кандидат физико-математических наук (1998). В настоящее время работает доцентом на кафедре радиофизики и нелинейной динамики. Область научных интересов: анализ временных рядов. Имеет более 40 работ, опубликованных в отечественной и зарубежной печати.  
E-mail: pavlov@chaos.ssu.runnet.ru