

## АНАЛИЗ ЭНЦЕФАЛОГРАММ НА ОСНОВЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЦЕПОЧЕК ЛОКАЛЬНЫХ МАКСИМУМОВ СКЕЙЛОГРАММ

*Туровский Я.А., кандидат медицинских наук, доцент кафедры цифровых технологий, руководитель лаборатории информационных технологий в медицине факультета компьютерных наук Воронежского государственного университета; e-mail: yaroslav\_turovsk@mail.ru*

*Кургалин С.Д., доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой цифровых технологий факультета компьютерных наук Воронежского государственного университета; e-mail: kurgalin@bk.ru*

*Семёнов А.Г., студент факультета компьютерных наук Воронежского государственного университета; e-mail: smallcsf@gmail.com*

**Ключевые слова:** вейвлет-анализ, био-медицинская информация, электроэнцефалограмма.

### Введение

В настоящее время значительный интерес представляет разработка методов анализа электроэнцефалограмм (ЭЭГ), позволяющих получать новую физиологически и клинически значимую информацию об особенностях электрогенеза головного мозга. Несмотря на широкое применение вейвлет-преобразования при исследовании биомедицинских сигналов, пока ещё недостаточно используется весь объем важной информации, заключенной в матрице коэффициентов вейвлет-преобразования.

Целью настоящей работы является создание метода, обеспечивающего анализ структур цепочек локальных максимумов (ЦЛМ), получаемых на основе матрицы квадратов коэффициентов вейвлет-преобразования сигналов ЭЭГ, как маркеров состояний головного мозга, возникающих при решении различных задач. Он также может быть использован при разработке систем биологической обратной связи или нейрокомпьютерных интерфейсов.

### Метод анализа структур цепочек локальных максимумов скейлограмм

Для проведения исследования сигналов ЭЭГ используется непрерывное вейвлет-преобразование [1]:

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

где  $f(t)$  – анализируемые данные, зависящие от времени  $t$ ;  $\Psi$  – вейвлет;  $a$  и  $b$  – параметры масштаба и времени для вейвлет-преобразования;  $a, b \in R$ ;  $a > 0$ .

Используя матрицу вейвлет-коэффициентов  $W(a, b)$ , можно построить «энергетические» диаграммы – скейлограммы  $V(a_i)$  сигналов как среднее значение квадратов этих коэффициентов при фиксированном параметре масштаба  $a_i$  [2]:

$$V(a_i) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N W^2(a_i, b_k), \quad (2)$$

Показана принципиальная возможность извлечения из электроэнцефалограмм (ЭЭГ) важной для исследователя информации на основе анализа структуры цепочек локальных максимумов на скейлограммах, получаемых при использовании непрерывного вейвлет-преобразования. Проявлена высокая информативность предложенного метода при изучении состояний головного мозга, отображаемых на ЭЭГ.

где  $N$  – число усредняемых вейвлет-коэффициентов  $W(a_i, b_k)$ .

Важную информацию о процессах, происходящих в исследуемых органах и системах, в том числе и в головном мозге, несет в себе частотно-временная структура локальных максимумов и минимумов матрицы вейвлет-коэффициентов  $W(a, b)$  или скейлограмм [3].

Используя правило  $k/\Delta b \rightarrow l$  (разности порядкового номера локального спектра ( $b_e$ ), в состав которого входит последний максимум строящейся цепочки локальных максимумов (ЦЛМ), и порядкового номера первого спектра ( $b_s$ ) к числу  $k$ , входящих в неё точек), смысл которого в максимизации длины непрерывных ЦЛМ, можно получить выражение для логической функции  $f(a, b)$  принятия решения о включении (или не включении) локального экстремума с координатами  $(a_i, b_j)$  в конкретную ЦЛМ

$$f(a_i, b_j) = \begin{cases} 1, & (a_i \in [(a_{i-1} - (va_s + u)), (a_{i-1} + (va_s + u))]) \wedge \\ & (b_j \in (b_{j-1}), (b_{j-1} + (va_s + u))); \\ 0, & (a_i \in [(a_{i-1} - (va_s + u)), (a_{i-1} + (va_s + u))]) \vee \\ & (b_j \in (b_{j-1}), (b_{j-1} + (va_s + u))), \end{cases} \quad (3)$$

где  $a_{i-1}$  – масштаб локального максимума концевой точки ЦЛМ, ближайшей по величине масштаба к предполагаемому для включения в ЦЛМ локальному максимуму;  $b_{j-1}$  – время (или номер отсчёта, номер скейлограммы) концевой точки ЦЛМ, ближайшей по времени (номеру отсчёта, номеру скейлограммы) к аналогичному значению предполагаемого для включения в ЦЛМ локального максимума;  $a_s$  – значение масштаба первой точки формирующейся ЦЛМ. Константы  $u$  и  $v$  получены при использовании правила максимизации отношения  $k/\Delta b \rightarrow l$  и при наибольших для данного диапазона масштабов зна-

чений  $k$ . Так, например, для вейвлетов Морле и WAVE  $u=3$  и  $v=0.05$ .

Полученное таким способом множество ЦЛМ может быть подвергнуто дальнейшему изучению с целью выявления в них значимых элементов. Целесообразно использовать для этого следующие характеристики ЦЛМ: масштаб вейвлет-преобразования  $a$  (или соответствующую частоту), при котором появилась ( $a_s$ ) или прервалась ( $a_f$ ) данная ЦЛМ; время появления  $t_s$  и прекращения  $t_f$  ЦЛМ; длительность ЦЛМ  $\Delta t = t_f - t_s$ ; «дрейф» масштаба  $\Delta a = a_s - a_f$ ; количество  $k$  локальных максимумов в ЦЛМ; отношение  $k/\Delta b$ , отражающее «плотность» локальных максимумов в ЦЛМ. Указанные выше значения, как и сами ЦЛМ (в виде их координат в пространстве с осями  $t$  и  $a$ ), в дальнейшем можно применять для статистической обработки исследуемых данных, при разработке или изучении систем биологической обратной связи или нейро-компьютерных интерфейсов.

**Реализация метода и обсуждение результатов**

Для достижения поставленной в статье цели были использованы ЭЭГ, зарегистрированные у 36 здоровых испытуемых. В качестве функциональных проб проводилась фотостимуляция световыми сигналами различной частоты и интенсивности. Для 19 испытуемых были получены данные при их работе с нейрокомпьютерными интерфейсами, реализованными по технологии SSVEP (Steady-State Visual Evoked Potentials), основанной на выделении вызванных зрительных потенциалов головного мозга, частота которых соответствует частоте проводимой фотостимуляции.

Рассмотрим изменение положения локальных максимумов вейвлетной плотности мощности  $W^2(a,b)$ , отмечаемое в процессе анализа регистрируемого сигнала ЭЭГ.

Как видно из рис. 1, где показано расположение ЦЛМ для матрицы  $W^2(a,b)$  вейвлет-коэффициентов данных ЭЭГ, полученных после решения испытуемым логической задачи при демонстрации ему «черного» экрана монитора в соответствии со штатной процедурой, используемой при психофизиологических исследованиях [5], в общем случае получено, что  $a_s \neq a_f$ , и, следовательно, имеет место дрейф локальных максимумов в частотном пространстве. Используя нейрофизиологические парадигмы [4, 5], можно на их основе связать дрейф локальных максимумов с увеличением или уменьшением активности в частотном пространстве пулов нейронов, определяющих картину ЭЭГ.

В ходе анализа полученных данных обнаружено, что распределение масштабов «частот» появления ЦЛМ в условиях, когда не требуется высокого уровня мозговой активности, сохраняется в виде индивидуальных распределений для каждого испытуемого (рис. 1-3).

При этом гистограмма распределения числа ЦЛМ по частотам (но не по масштабам) имеет полимодальный вид и содержит пики в диапазонах  $\alpha$ -,  $\beta$ -, и  $\gamma$ - ритмов. Таким образом, установлено, что число ЦЛМ не увеличивается пропорционально уменьшению частоты. В

тоже время, возрастает значение  $\Delta t$  (продолжительности ЦЛМ), что, вероятно, демонстрирует увеличение длительности активности пула нейронов, связанных с данной цепочкой (рис. 4).

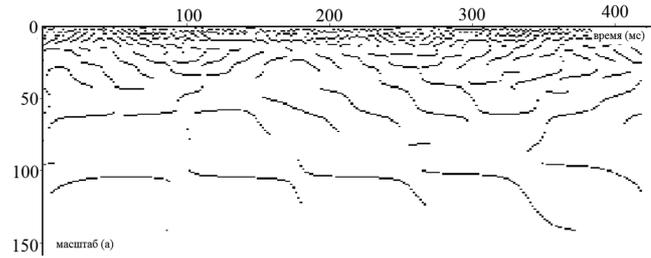


Рис. 1. Картина расположения ЦЛМ для матрицы  $W^2(a,b)$ , получаемой из данных ЭЭГ при решении испытуемым логической задачи. Было использовано отведение Oz, частота дискретизации сигнала – 0.5 кГц, период построения скейлограммы – 2 мс

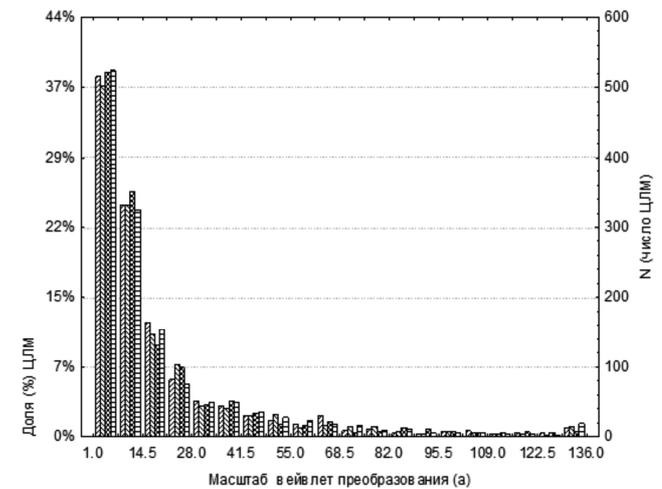


Рис.2. Распределение величин масштабов вейвлет-преобразования  $a_s$  (здесь приведены доли ЦЛМ в % по отношению к их общему числу за время эксперимента и  $N$  – число ЦЛМ) для четырёх одинаковых состояний одного испытуемого в эксперименте, когда происходит инверсия белого и черного квадратов на экране монитора. Видно отсутствие значимых различий между разными реализациями одного и того же состояния ( $p >> 0.05$ )

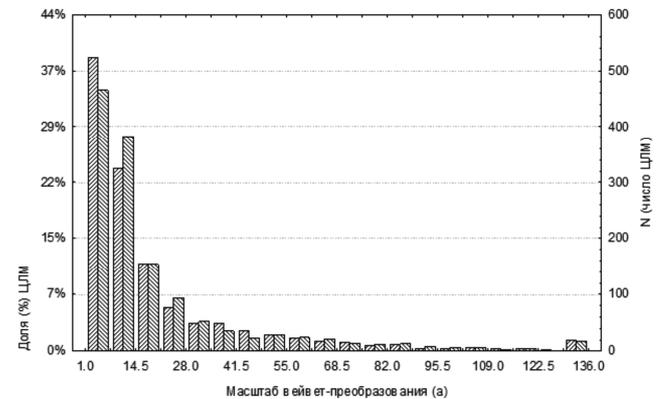


Рис.3. Распределение величин  $a_s$  для двух одинаковых состояний двух испытуемых (при изменении цвета экрана монитора с белого на чёрный). График указывает на отсутствие значимых различий между одним состоянием ЭЭГ двух пользователей, в данном распределении ( $p > 0.05$  для теста Колмогорова-Смирнова)

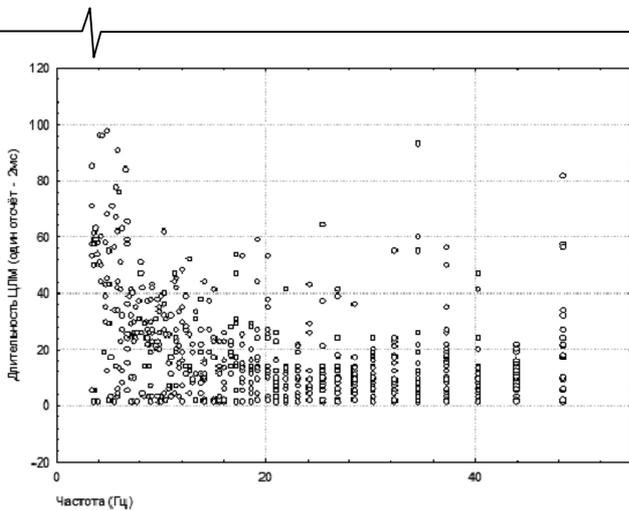


Рис.4. Зависимость длительности ЦЛМ от частоты локализации первого локального максимума цепочки.

Видно, что с ростом частоты, на которой появляется ЦЛМ, её длина уменьшается

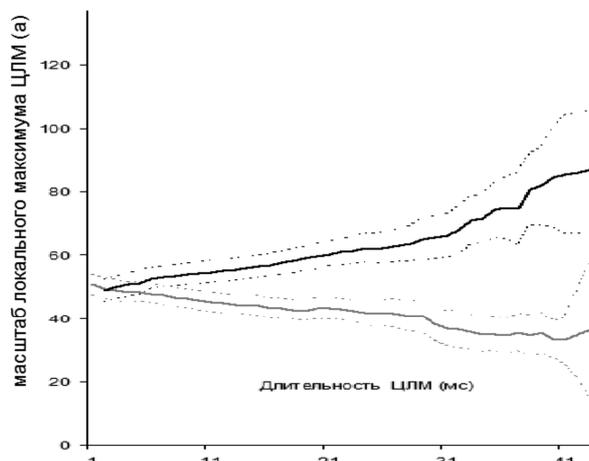


Рис.5. Изменение в частотном пространстве координат локальных максимумов, усреднённых по испытуемому (усреднение проводится по времени; отведение Oz; испытуемый находится в состоянии покоя с закрытыми глазами). Сплошная черная линия – средние значения масштаба локальных максимумов для одного типа динамики ЦЛМ, сплошная серая линия – для другого. Пунктирными линиями соответствующего цвета отмечен 95% доверительный интервал для усреднения

Важно отметить, что данная зависимость, являясь статистически значимой ( $p < 0.001$  расчеты проводились для всей группы испытуемых), сохраняется в диапазоне частот от 3 до 50 Гц (при индивидуальных верхних и нижних границах такого диапазона для каждого испытуемого). В то же время, при частоте свыше 50 Гц данная зависимость не наблюдается, что, возможно, связано с низкой разрешающей способностью используемых вейвлетов при данной частоте дискретизации в конкретном диапазоне. Как следствие, те ЦЛМ, которые при лучшем разрешении по частоте были бы разделены, теперь сливаются в одну цепочку, и, в итоге, установленная зависимость нарушается. Наряду с этим, относительно высокое разрешение по частоте можно использовать только при компьютерном offline-исследовании, поскольку при применении вейвлетов Морле,

обладающих одной из самых высоких разрешающих способностей среди популярных вейвлетов в медико-биологических исследованиях, невозможно проводить оперативный вейвлет-анализ сигналов ЭЭГ с задержкой менее 2-3 с., что, например, является проблемой при использовании таких вейвлетов в технологиях нейрокомпьютерного интерфейса или биологической обратной связи.

Следует отметить, что независимо от состояния испытуемого, ЦЛМ имеют преимущественно индивидуально однонаправленный дрейф в частотном пространстве либо в сторону уменьшения, либо в сторону увеличения частот. Иными словами, частота локальных максимумов, формирующих цепочки, или последовательно друг за другом непрерывно нарастала, или таким же образом уменьшалась. Доля ЦЛМ, для которых изменяется направление дрейфа (когда сначала происходит увеличение частоты, а затем её спад или же наоборот), не превышает 18.5% для всех испытуемых, их состояний или каналов регистрации ЭЭГ. Даже в состоянии покоя в каждом из «классических» диапазонов ЭЭГ ( $\delta$ -ритм: 0.5-3 Гц;  $\theta$ -ритм: 4-7 Гц;  $\alpha$ -ритм: 8-13 Гц;  $\beta$ -ритм: 15-40 Гц;  $\gamma$ -колебания: > 40 Гц) присутствуют ЦЛМ, дрейфующие как в сторону увеличения частот, так и их уменьшения (рис.5). Естественно, что ЦЛМ не разделяются по частотам в соответствии с «классическими» диапазонами ЭЭГ: начавшись в одном из диапазонов, ЦЛМ может прерваться в другом диапазоне. В ряде случаев цепочка после перехода в соседний диапазон может в дальнейшем вернуться в исходный.

Анализ динамики ЦЛМ показал, что в случае решения испытуемым логических или образных задач, при работе с системами биологической обратной связи или с нейрокомпьютерными интерфейсами, изменения ЦЛМ в частотном диапазоне носят стабильный характер, что отражается в меньшем изменении частотной локализации максимумов скейлограмм. Таким образом, изменение мозговой активности при различных функциональных состояниях испытуемого приводит к изменению (увеличению или уменьшению) частотных характеристик участков ЦЛМ. Можно сделать вывод, что основная часть динамики поведения ЦЛМ имеет индивидуально-специфический характер, то есть она определяется не столько типом задач, решаемых испытуемым, сколько исходной динамикой ЦЛМ в спокойном его состоянии.

## Заключение

В настоящей работе предложен метод исследования динамики поведения ЦЛМ на скейлограммах, полученных при непрерывном вейвлет-преобразовании сигнала ЭЭГ. Отмечено, что структура ЦЛМ обладает достаточной устойчивостью в частотном пространстве и воспроизводимостью динамики дрейфа для любого состояния конкретного пользователя. Продемонстрировано изменение числа ЦЛМ и их длительности при изменении частот ЭЭГ, для которых формируется цепочка. Это доказывает, что длина ЦЛМ зависит от значений частот, в диапазоне которых она находится. Показаны особенности динамики поведения ЦЛМ для различных состояний испытуемых.

## Литература

1. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. – 1996. – Т. 166, № 11. – С. 1145-1170.
2. Scargle J.D. Wavelet and Other Multi-resolution Methods for Time Series Analysis // Statistical Challenges in Modern Astronomy II / Ed. G.J.Babu and E.D.Feigelson. – N.Y.: Springer-Verlag, 1997 – P. 333-347.
3. Кургалин С.Д., Туровский Я.А., Максимов А.В., Насер Н. Вейвлет-анализ энцефалограмм // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2010. – №1. – С. 89-94.
4. Сороко С.И., Трубачев В.В. Нейрофизиологические и психофизиологические основы адаптивного биоуправления. – СПб., Политехника-сервис, 2010. – 607 с.

5. Основы психофизиологии: Учебник / Отв. ред. Ю.И. Александров. – М.: ИНФРА-М, 1997. – 349 с.

## THE ELECTROENCEPHALOGRAMS ANALYSIS ON LOCALS MAXIMUMS SCALEGRAMMS CHAINS INVESTIGATION BASE

*Turovsky Ya.A., Kurgalin S.D., Semenov A.G.*

It is shown that a new type of informative observables can be extracted from electroencephalograms on the basis of the analysis of structure of sequences of local maxima found in real time wavelet transformation on scalograms. The efficiency of this method as a tool for the study of the activity of brain is demonstrated.

## ИНФОРМАЦИЯ

### 15-я Международная научно-техническая конференция «ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ И ЕЁ ПРИМЕНЕНИЕ-DSPA'2013»

Отвечая целям и задачам консолидации и поддержки отечественных ученых и специалистов, работающих в области передовых информационных технологий реального времени, расширения международных научных связей и содействия внедрению высоких наукоемких технологий XXI века, Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи имени А.С. Попова совместно с компанией «AUTEX.Ltd» при поддержке РФФИ и при участии Федерального агентства по промышленности РФ, Министерства образования и науки РФ, Российской секции IEEE Signal Processing Society, Института радиотехники и электроники РАН, Института проблем управления РАН, ЗАО «МНИТИ», МГТУ им. Н.Э. Баумана, МТУСИ, МАИ, МЭИ, РГРТУ и других ведущих российских вузов и организаций, провели 27 – 29 марта 2013 г. в ИПУ РАН 15-ю Международную научно-техническую конференцию: «Цифровая обработка сигналов и её применение- DSPA'2013». В работе конференции приняли участие свыше 500 человек из 39 городов России и стран СНГ, а также представители ряда стран дальнего зарубежья.



Работа конференции проходила по восьми секциям:

«Теория сигналов и систем» (16 докладов, руководители – д.т.н., профессор Ю.С. Шинаков, д.т.н., профессор М.С. Немировский); «Теория и методы цифровой обработки сигналов» (19 докладов, руководители – д.т.н., профессор Ю.А. Брюханов, д.т.н., В.И. Джиган); «Обработка сигналов в системах телекоммуникаций» (38 докладов, руководители – д.т.н., профессор Ю.Н. Прохоров, к.т.н., профессор Санников В.Г.); «Обработка сигналов в радиотехнических системах» (35 докладов, руководители – д.т.н., профессор В.Г. Бартенев, к.т.н., профессор В.С. Сперанский); «Обработка и передача изображений» (39 докладов, руководители – д.т.н., профессор В.П. Дворкович, д.т.н., профессор А.В. Дворкович); «Обработка измерительной информации» (17 докладов, руководитель – к.т.н., профессор Ю.В. Скачко); «Проектирование и техническая реализация систем ЦОС» (16 докладов, руководители – д.т.н., профессор В.В. Витязев, к.т.н., доцент В.Б. Стешенко); «Цифровая обработка многомерных сигналов» (13 докладов, руководитель – д.т.н., профессор М.К. Чобану). На конференции было заслушано около 200 докладов, по материалам которых изданы «Труды Конференции» в 2-томах, общим объемом 706 страниц.

На пленарном заседании, в день открытия конференции, были заслушаны 7 докладов, в которых нашли отражение вопросы развития теории и методов пространственно-временной обработки сигналов, промышленного внедрения системы безопасного управления на базе ЦОС в новых поездах московского метрополитена, концептуального развития сотовой связи, теории и применения многоскоростной обработки сигналов, нейросетевых технологий, состояния и перспектив внедрения цифрового телевизионного вещания.

Во второй день работы Конференции состоялись семинары: «Digital Signal Processors» фирмы «Analog Devices, Inc.» и «Реализация эффективных алгоритмов при помощи System C и трансляции в RTL – язык на ПЛИС» компании «Макро Групп».

Хотелось бы особо отметить активное участие в нашей Конференции молодых ученых. Как и в предыдущие годы, по представленным результатам исследований, был проведен конкурс среди молодых ученых, аспирантов и специалистов на лучший доклад. Вручение дипломов лауреатам конкурса состоялось в день закрытия Конференции: 29 марта в 14-00, в Малом конференц-зале.

Информационно-издательскую поддержку работы Конференции обеспечивают научно-технические журналы: «Цифровая обработка сигналов», «Радиотехника», «Электросвязь» и другие издательства, принимающие непосредственное участие в работе Конференции. В частности, редакционная коллегия журнала «Цифровая обработка сигналов» планирует по материалам работы всех 8 секций Конференции подготовить тематический выпуск во втором номере 2013 года, а журнал «Электросвязь» – тематическую подборку статей: «ЦОС в системах телекоммуникаций», в одном из номеров текущего года.

Следующая, 16-я Международная конференция и выставка DSPA'2014», планируется ориентировочно в марте 2014 г., в г. Москве, ИПУ РАН. За информацией следите на сайте [www.rntores.ru](http://www.rntores.ru)