

КЛАССИФИКАЦИЯ ДИНАМИКИ ЛОКАЛЬНЫХ МАКСИМУМОВ В ВЕЙВЛЕТ-СПЕКТРАХ ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАММ

Я.А. Туровский¹, С.Д. Кургалин², А.Г. Семёнов², А.В. Максимов²

*Лаборатория «Информационные технологии в медицине» (1);
кафедра «Цифровые технологии» (2), ФГБОУ ВПО «Воронежский
государственный университет», г. Воронеж; kurgalin@bk.ru*

Ключевые слова и фразы: вейвлет-преобразование; разрешение по частоте; электроэнцефалограмма.

Аннотация: Продемонстрирована информативность цепочек частотных локальных максимумов, полученных при анализе матриц непрерывного вейвлет-преобразования сигналов электроэнцефалограмм, для выявления активности участков головного мозга. В экспериментах на здоровых добровольцах показана возможность использования числа цепочек локальных максимумов для оценки индивидуально-типологических особенностей электроэнцефалограмм.

Разработка автоматизированных систем определения состояний организма, в том числе и центральной нервной системы, требует поиска новых феноменов физиологической активности, необходимых для точной и быстрой оценки функционирования органов и систем человека как в норме, так и при различных патологиях. Однако не все выявленные феномены могут с равным успехом применяться для автоматизации мониторинга состояния человека, так как они должны удовлетворять ряду условий: легкости нахождения и использования, устойчивости к помехам, связанным как с деятельностью человека, так и имеющим техническую природу. При этом желательно автоматизировать большой объем расчетов и создать эффективные системы обработки данных в реальном масштабе времени, обеспечивающие одновременный синхронный мониторинг больших групп пациентов. Разработанная система параллельно распределенных вычислений [1, 2], использующая, в том числе и метод поиска цепочек локальных максимумов (ЦЛМ) в матрицах непрерывного вейвлет-преобразования сигналов электроэнцефалограмм (ЭЭГ), позволила получить данные для прогноза динамики активности участков головного мозга человека при решении им задач в рамках использования систем нейро-компьютерных интерфейсов. Тем не менее, нерешенной является задача картирования выявленных феноменов. Иными словами, следует установить привязку тех или иных особенностей ЦЛМ, выявленных при обработке ЭЭГ, к определенным участкам головного мозга с тем, чтобы в дальнейшем обеспечить связь между выявленными феноменами ЭЭГ и феноменами психической активности человека, что является реальной основой для создания на базе феномена ЦЛМ систем биологической обратной связи [3] (в случае использования канала ЭЭГ) и нейро-компьютерного интерфейса [4].

Целью работы является развитие метода анализа активности центральной нервной системы в целом, и головного мозга в частности, на основе типологиза-

ции и классификации ЦЛМ на вейвлетной «энергетической» диаграмме (скейлограмме), получаемой при обработке данных ЭЭГ.

В предлагаемом методе используется непрерывное вейвлет-преобразование, в результате применения которого к данным ЭЭГ получается матрица вейвлет-коэффициентов $W^2(a, b)$, содержащая информацию о вкладе частотной компоненты масштаба a в момент времени b в общую картину сигнала [5].

Таким образом, наиболее выраженные значения «энергии» сигнала, представляющие собой пики на срезе на поверхности $W^2(a, b)$ при фиксированном значении b (или в определенном диапазоне параметра b), могут быть использованы для оценки числа наиболее выраженных частотных компонент, генерируемых на ЭЭГ различными структурами головного мозга.

Очевидно, что подобные пики будут иметь динамическое поведение в частотном пространстве, «сдвигаясь» в ходе развития во времени какого-либо процесса в головном мозге либо в сторону более высоких, либо низких частот, что, возможно, отражает как изменение активности различных осцилляторов, формирующих сигнал ЭЭГ, так и взаимодействие между ними, носящее, вероятно, нелинейный характер. Таким образом, формируются ЦЛМ, анализ которых представляет значительный интерес с точки зрения разработки новых автоматизированных систем определения нейрофизиологических коррелят психической деятельности человека, пригодных для использования в системах нейро-компьютерного интерфейса и биологической обратной связи.

Для выявления подобных феноменов применительно к ЦЛМ была проведена серия экспериментов с 19-ю испытуемыми (3 девушки и 16 юношей в возрасте от 19 до 23 лет). Регистрировались ЭЭГ в «классическом» отведении в системе «10–20» прибором «Нейрон-Спектр-4/ВПМ» производства ООО «Нейрософт» (Россия), объединяющим в себе 21 канал с частотой дискретизации 250 Гц. Низкая частота дискретизации связана с ограничениями, накладываемыми на вычисления вейвлет-коэффициентов в реальном масштабе времени и с минимальными временными задержками (применительно к описываемым экспериментам – не более длины одной серии, то есть от 2 до 5 с после окончания предыдущей серии экспериментов) [6]. Регистрировалась ЭЭГ-активность в ответ на инверсию (изменение с белого цвета на черный) экрана жидкокристаллического монитора диагональю 17 дюймов, расположенного на расстоянии 1,5–2 м от лица испытуемого, происходившую по истечении 5 с после предъявления испытуемому логической или образной задачи. С каждого испытуемого регистрировалось по 100 серий экспериментальных данных, не содержащих артефактов. В каждую серию экспериментов была включена демонстрация на экране монитора образной или логической задачи, после ее решения в течение 5 с показывался черный экран, после чего появлялась задача следующей серии. Полученные данные обрабатывались с использованием вейвлета Morlet на системе параллельно-распределенных вычислений, реализованной на видеокартах NVIDIA по технологии CUDA [6], использующей процессоры видеокарт для параллельных расчетов. Данный вейвлет дает одно из лучших разрешений по частоте среди многих используемых вейвлетов при наличии умеренного разрешения по времени, что позволяет широко его использовать в оффлайн расчетах или в случаях, когда задержка по времени при обработке сигналов ЭЭГ не имеет при проведении эксперимента решающего значения [7]. Полученная после непрерывного вейвлет-преобразования матрица коэффициентов путем возведения каждого ее элемента в квадрат превращалась в матрицу вейвлетных «энергетических» диаграмм (скейлограмм), в которой и производился поиск локальных максимумов, объединяемых в дальнейшем, исходя из их частотно-временных характеристик, в ЦЛМ. При этом было выявлено пять типов ЦЛМ.

1. Стабильно растущая по частоте ЦЛМ (рис. 1, область А). Такой тип ЦЛМ характерен для ЭЭГ в состоянии покоя. Анализ динамики изменения во времени частоты ЦЛМ этого типа позволяет предположить наличие у него нескольких подтипов.

2. Стабильно убывающая по частоте ЦЛМ (см. рис. 1, область Б). Как и для первого типа, характер убывания значений локальных максимумов в частотной области достаточно различается внутри данного типа.

3. ЦЛМ, практически не изменяющаяся в частотном пространстве (см. рис. 1, область В). Осциллятор (или группа осцилляторов), модулирующий процесс в головном мозге, не увеличивает и не уменьшает своей частоты в пределах разрешающей способности используемого вейвлета.

4. ЦЛМ, демонстрирующая сначала рост частоты локальных максимумов, а потом ее уменьшение, при том что завершиться она может как на более высокой, так и на более низкой частоте по сравнению с начальной (см. рис. 1, область Г).

5. ЦЛМ, в которой частота локальных максимумов первоначально уменьшается при последующем ее росте. Как и для предыдущего типа, отношение частот начала и завершения ЦЛМ может быть различным (см. рис. 1, область Д).

Разработанный на базе предлагаемого метода оригинальный программный пакет используется для классификации ЦЛМ всех проведенных наблюдений, при этом от одного испытуемого получается до 100 реализаций серии экспериментов, каждая из которых содержит данные, отражающие частоту появления всех указанных пяти типов ЦЛМ. Таким образом, были получены данные, отражающие распределение ЦЛМ по отведениям ЭЭГ (фактически, по отделам головного мозга) и по типу ЦЛМ для разных испытуемых (рис. 2). Из рисунка 2 видно, что наиболее часто встречающиеся цепочки – первого и второго типов: последовательно нарастающие и последовательно убывающие. Несколько отстают от них по частоте появления цепочки третьего типа, они характеризуются отсутствием динамики в частотном пространстве, что, скорее всего, можно объяснить недостаточным разрешением используемого вейвлета Morlet по частоте сигнала, учитывая невысокие значения частоты дискретизации. Для цепочек четвертого и пятого типов, меняющих направление тренда в частотном пространстве, характерна наиболее низкая частота появления.

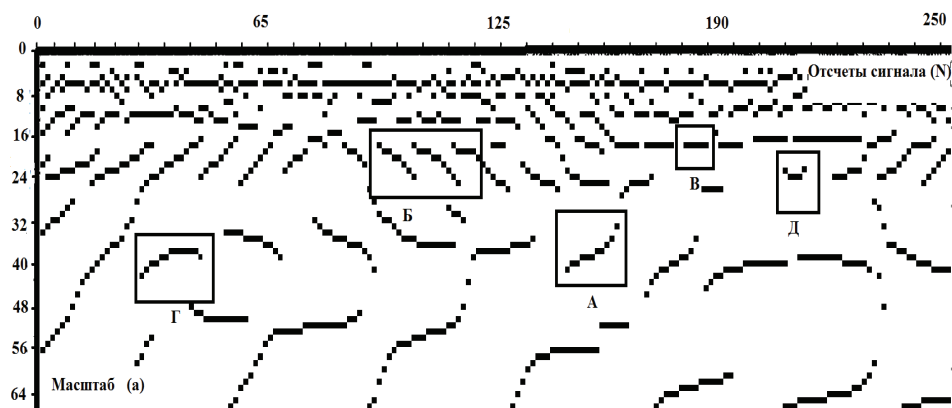


Рис. 1. Распределение локальных максимумов в матрице квадратов коэффициентов вейвлет-преобразования $W^2(a, b)$ сигналов ЭЭГ, построенное на основе скейлограмм. Отведение F4, частота дискретизации – 0,25 кГц. По оси абсцисс отложено время в виде отсчетов сигнала, по оси ординат – масштаб вейвлет-преобразования. Области типов ЦЛМ: А–Д – 1–5 соответственно

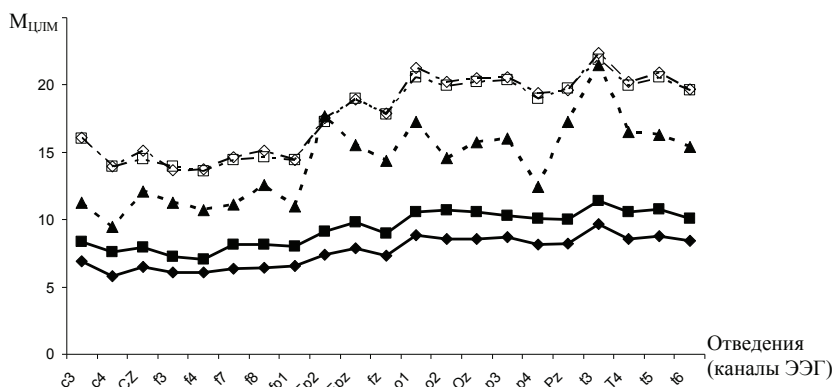


Рис. 2. Средние значения числа ЦЛМ ($M_{\text{ЦЛМ}}$) разных типов (1–5) по 100 экспериментам для конкретного испытуемого для разных отведений (каналов ЭЭГ), получаемых в ответ на переключение экрана монитора с представления образной или логической задачи на черный цвет. Обозначения отведений ЭЭГ (каналов регистрации ЭЭГ) соответствуют международной системе «10–20»; □ – тип 1; ◇ – тип 2; ▲ – тип 3; ■ – тип 4; ◆ – тип 5

Учитывая, что распределения ЦЛМ не могут быть отнесены к нормальному типу, полученные данные были подвергнуты статистической обработке с использованием непараметрических критериев Манна–Уитни и Краскела–Уоллеса. При проведении исследования вводилась поправка на эффект множественных сравнений. Установлены статистически значимые различия ($p < 0,001$) для числа ЦЛМ в зависимости от отведения (канала регистрации) ЭЭГ, типа ЦЛМ и характеристик конкретного испытуемого. Это позволяет утверждать, что множество ЦЛМ представляет собой уникальную систему сигналов, «привязанную» к отдельному пользователю и отражающую типологические особенности функционирования его центральной нервной системы. В то же время, число ЦЛМ первого и второго типов значимо не различалось ($p > 0,05$ с учетом эффекта множественных сравнений), что позволяет рассматривать их как два разных проявления одного и того же реального процесса, происходящего в головном мозге.

Важно отметить, что особенности распределения числа ЦЛМ связаны как с конкретным отведением ЭЭГ (каналом регистрации), так и с индивидуальными особенностями человека. Например, вариационный размах (то есть разница между минимальным и максимальным значениями исследуемого вариационного ряда) изменялся от 1 до 144 цепочек, при том что различие в длинах зарегистрированных сигналов ЭЭГ не превышало 10 точек.

Анализ распределения числа ЦЛМ для всех серий экспериментов и вариантов отведений у всех испытуемых (рис. 3) не позволил отнести ни одно из них к нормальному закону (при этом проводился анализ моментов распределения: асимметрии и эксцесса, а также применялись критерии Шапиро–Уилка и Колмогорова–Смирнова). Следовательно, использование именно непараметрических критериев в расчетах можно считать обоснованным. При этом мощность использованных статистических критериев обеспечивается большим числом наблюдений (более 400 000 элементов в статистическом анализе с использованием критерия Краскела–Уоллеса).

Анализируя количественную асимметрию в появляющихся ЦЛМ, то есть различия в числах ЦЛМ, полученных с симметричных участков головного мозга, установлено, что с учетом эффекта множественных сравнений такие различия

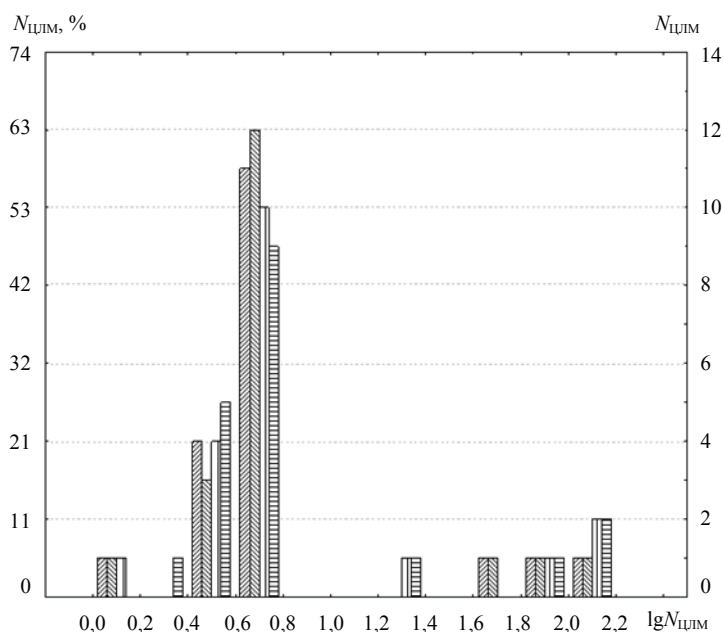


Рис. 3. Гистограммы распределения логарифма числа ЦЛМ, полученные для одного испытуемого в эксперименте. По оси абсцисс отложены логарифмы числа ЦЛМ определенного типа, по оси ординат – число ЦЛМ данной длины (справа) и доля ЦЛМ данной длины в процентах от общего числа ЦЛМ (слева); ▨ – тип 1 (с3); ▩ – тип 2 (с3); ▧ – тип 1 (о1); ▦ – тип 2 (о1) (в легенде указаны типы ЦЛМ и в скобках – отведения (каналы) регистрации ЭЭГ)

($p < 0,001$) наблюдаются только в теменной области мозга (отведения t3–t4) и в лобных долях (отведения f3–f4). Для остальных участков мозга подобная асимметрия не обнаружена ($p > 0,05$). Отметим, что данные различия наблюдались у всех испытуемых, в то время как при индивидуальном подходе имелись и статистически значимые паттерны асимметрии по разным отведениям ЭЭГ, характерные для каждого человека и демонстрирующие устойчивость результатов экспериментов от серии к серии.

Таким образом, продемонстрирована вариативность цепочек локальных частотных максимумов, полученных в ходе анализа матриц непрерывного вейвлет-преобразования сигналов ЭЭГ. Показана принципиальная возможность выявления большого числа ЦЛМ (полученных с использованием вейвлета Morlet), существенно изменяющих свои свойства с течением времени при выполнении различного рода заданий испытуемыми. В экспериментах на здоровых добровольцах показана возможность использования числа ЦЛМ для оценки индивидуально-типологических особенностей ЭЭГ, продемонстрирована функциональная асимметрия данного показателя. Установлено, что распределение ЦЛМ и в популяции, и для индивидуумов носит островершинный асимметричный характер, приближаясь к распределениям β -типа. Продемонстрировано, что выделенные пять типов цепочек существенно и статистически значимо отличаются друг от друга, при этом их число тесно связано с областью мозга, откуда происходит регистрируемый сигнал ЭЭГ. Показано, что наиболее часто встречаются ЦЛМ первого и второго типов, реже – третьего. Наиболее редко встречаются ЦЛМ четвертого и пятого типов. Проведено картирование распределения конкретных типов ЦЛМ на различных отведениях (каналах) энцефалограмм.

Список литературы

1. Туровский, Я.А. Выбор анализирующих вейвлетов для системы с параллельной обработкой биомедицинских данных / Я.А. Туровский, С.Д. Кургалин, А.В. Максимов // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер. Систем. анализ и информ. технологии. – 2011. – № 2. – С. 74–79.
2. Аппаратно-программный комплекс обработки методико-биологических данных в реальном масштабе времени / С.Д. Кургалин [и др.] // Энергия – XXI век. – 2009. – № 2(72). – С. 47–52.
3. Сороко, С.И. Нейрофизиологические и психофизиологические основы адаптивного биоуправления / С.И. Сороко, В.В. Трубачев. – СПб. : Политехника-сервис, 2010. – 607 с.
4. Wolpaw, J.R. Control of a Twodimensional Movement Signal by a Noninvasive Brain-Computer Interface in Humans / J.R. Wolpaw, D.J. McFarland // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. – 2004. – Vol. 101(51). – P. 17849–17854.
5. Астафьева, Н.М. Вейвлетный анализ: основы теории и примеры применения / Н.М. Астафьева // Успехи физ. наук. – 1996. – Т. 166, № 11. – С. 1145–1170.
6. NVIDIA : офиц. сайт [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.nvidia.ru/object/cuda_home_new_ru.html. – Загл. с экрана.
7. Фактор времени при реализации непрерывного вейвлет-преобразования для анализа сигналов ЭЭГ / Я.А. Туровский [и др.] // Информ. технологии в проектировании и пр-ве. – 2012. – № 2. – С. 61–66.

Classification of Local Maxima Dynamics in Wavelet Spectrum of Electroencephalograms

Ya.A. Turovsky¹, S.D. Kurgalin², A.G. Semyonov², A.V. Maksimov²

*Laboratory of Information Technologies in Medicine (1);
Department of Digital (2), Voronezh State University, Voronezh;
kurgalin@bk.ru*

Key words and phrases: electroencephalogram; frequency resolution; wavelet transformation.

Abstract: The paper presents the descriptiveness of frequency local maxima chains obtained from the analysis of the matrix of the continuous wavelet transformation signals of electroencephalogram to identify the active areas of the brain. In the experiments on healthy volunteers, the possibility of using the number of chains of local maxima to assess individual and typological features of electroencephalogram is shown.

Klassifikation der Dynamik der lokalen Maximen in den Bailvet-Spektren der Elektroenzephalogrammen

Zusammenfassung: Im vorliegenden Artikel ist die Informativität der Ketten der Frequenz des lokalen Maximas von der Analyse der Matrix der kontinuierlichen Wavelet-Transformation Signale Elektroenzephalogramm, um die aktiven Bereiche des

Gehirns identifizieren, demonstriert. In Experimenten an gesunde Freiwillige, die Möglichkeit der Verwendung der Anzahl von Ketten von lokalen Maxima, um individuelle und typologische Merkmale des Elektroenzephalogramm beurteilen.

Classification de la dynamique des maximums locaux dans les spectres Wavelet des électroencéphalogrammes

Résumé: Dans le présent ouvrage est montrée l'informativité des réseaux des maximums locaux fréquents obtenus lors de l'analyse des matrices de la wavelet-transformation continue des signaux des électroencéphalogrammes pour la déduction de l'activité des secteurs du cerveau. Dans les expériences avec les volontaires saints a été montrée la possibilité de l'emploi d'un nombre des réseaux des maximums locaux pour l'estimation des particularités individuelles et typologiques des électroencéphalogrammes.

Авторы: *Туровский Ярослав Александрович* – кандидат медицинских наук, доцент, заведующий лабораторией «Информационные технологии в медицине»; *Кургалин Сергей Дмитриевич* – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Цифровые технологии»; *Семёнов Александр Германович* – магистрант кафедры «Цифровые технологии»; *Максимов Алексей Владимирович* – аспирант кафедры «Цифровые технологии», ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный университет», г. Воронеж.

Рецензент: *Бормонтов Евгений Николаевич* – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики полупроводников и микроэлектроники, ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный университет», г. Воронеж.
