

## МЕТОД ОЦЕНКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ЭКСТРЕМУМОВ ДЛЯ МАТРИЦ КОЭФФИЦИЕНТОВ НЕПРЕРЫВНОГО ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СИГНАЛОВ ЭЭГ

*Туровский Я.А., к.м.н., доцент, заведующий лабораторией информационных технологий в медицине Воронежского государственного университета, e-mail: yaroslav\_turovsk@mail.ru;*

*Кургалин С.Д., д.ф.-м.н., заведующий кафедрой цифровых технологий Воронежского государственного университета, e-mail: kurgalin@bk.ru;*

*Семёнов А.Г., магистрант кафедры цифровых технологий Воронежского государственного университета, e-mail: smallcsf@gmail.com*

**Ключевые слова:** электроэнцефалограмма, непрерывный вейвлет-анализ, локальный спектр, цепочка локальных максимумов.

### Введение

Применение вейвлет-преобразований для анализа биомедицинских сигналов позволило расширить объём полезной информации, получаемой при обработке данных, регистрируемых с человека или животных в ходе клинических или физиологических исследований. Тем не менее, используемые в настоящее время методы, основанные на непрерывном вейвлет-преобразовании, в большинстве случаев не используют подходы, основанные на динамической оценке спектральных характеристик временного ряда исследуемых данных. Следовательно, актуальным является создание таких методов, в которых учитывается, что биомедицинские сигналы, в их числе и электроэнцефалограммы (ЭЭГ), представляют собой результат сложного нелинейного взаимодействия большого числа осцилляторов, формирующих электрические сигналы от изучаемых органов и систем. На получаемые данные также влияют и особенности органов и тканей, через которые проходит сигнал, прежде чем он достигнет датчика. Поэтому нужен подход, направленный на многосторонний анализ биомедицинских сигналов, включая данные ЭЭГ, основанный на непрерывном вейвлет-преобразовании, что поможет выявить особенности разворачивающихся во времени процессов в изучаемых органах и системах. Эти особенности, как уже отмечалось в [1-7], находят своё отражение в виде специфической динамики поведения цепочек локальных максимумов (ЦЛМ) или минимумов (ЦЛМин) матриц квадратов коэффициентов непрерывного вейвлет-преобразования.

Целью данной работы является разработка метода исследования динамики поведения локальных экстремумов матриц квадратов коэффициентов непрерывного вейвлет-преобразования сигналов ЭЭГ для определения областей, в которых наблюдается высокая концентрация цепочек локальных максимумов и минимумов. Анализ таких областей позволит дать оценку характеристикам процессов, происходящих в порождающих эти сигналы органах и системах.

*Предложен метод анализа биомедицинских сигналов на примере ЭЭГ, основанный на оценке структур, образованных в результате «взаимодействия» цепочек локальных максимумов – ЦЛМ и цепочек локальных минимумов – ЦЛМин в пространстве «масштаб вейвлет-преобразования – время». Разработаны алгоритмы детектирования таких структур, названных «областями сближения экстремумов» – ОСЭ. Проведенные вычислительные эксперименты с различными типами модельных сигналов (моночастотные гармоники, суммы нескольких гармонических сигналов, амплитудно-модулированные гармоники, белые и цветные шумы) показали, что формирование ОСЭ тесно связано с феноменом дрейфа ЦЛМ и ЦЛМин в частотном пространстве. Продемонстрирован подход к обработке результатов исследования для зрительных вызванных потенциалов головного мозга, а также определен способ классификации выявленных феноменов ЭЭГ.*

### Основные подходы к анализу цепочек локальных минимумов для матриц квадратов коэффициентов непрерывного вейвлет-преобразования

В результате непрерывного вейвлет-преобразования определенного сигнала (в т.ч. биомедицинского) получается матрица коэффициентов  $W(a,b)$ . Каждый из коэффициентов  $W(a,b)$  несёт в себе информацию об амплитуде сигнала в данный момент времени  $b$  на частоте (или масштабе)  $a$ . Возведя коэффициенты  $W(a,b)$  в квадрат и построив набор локальных спектров (скейлограмм, локальных энергетических спектров) [8], можно получить информацию о локальных экстремумах скейлограмм в каждый момент времени, а, следовательно, о наиболее или наименее выраженных частотных компонентах в исследуемом сигнале в определенный момент [8].

Как было показано в работах [4-7], локальные максимумы могут располагаться так, что можно считать, что они «объединяются» в особые структуры – цепочки локальных максимумов – ЦЛМ. Они обладают высокой информативностью при оценке феноменов ЭЭГ и вызванных потенциалов головного мозга, связанных с различными видами функциональных нагрузок человека [4-7].

Введем четыре правила для цепочек локальных минимумов (ЦЛМин), что, наряду с аналогичными правилами для цепочек локальных максимумов [4], необходимо для построения полной картины динамики поведения локальных экстремумов сигналов во времени.

1. Правило выделения ЦЛМин:  $k/\Delta b \rightarrow 1$ , где  $\Delta b$  – разность номеров отсчётов окончания и начала ЦЛМин для локальных спектров;  $k$  – число входящих в ЦЛМин точек. Суть этого правила в том, что оно даёт возможность, с одной стороны, выделить конкретную ЦЛМин, и с другой, избежать неправомерного объединения таких ЦЛМин в более длинную цепочку, при котором между ними имеются частотно-временные области без локальных минимумов.

2. Правило классификации на пять основных типов ЦЛМин по частотному дрейфу (т.е. по изменению частоты, на которой фиксируются элементы, составляющие цепочку): возрастающий; убывающий; не изменяющийся; убывающий, переходящий в растущий; растущий, переходящий в убывающий.

3. Правило классификации на пять основных типов ЦЛМин по изменению энергетических характеристик  $W^2(a, b)$  цепочки: возрастающий; убывающий; не изменяющийся; убывающий, переходящий в растущий; растущий, переходящий в убывающий.

4. Правило формирования кросс-типов, когда одна цепочка описывается и энергетической, и частотной её составляющими.

Как указывалось выше, подход, основанный на использовании ЦЛМ и ЦЛМин, позволяет существенно повысить информативность анализа биомедицинских сигналов. Однако он имеет и ряд недостатков, связанных, в первую очередь, с тем, что процесс изменения структуры локальных спектров во времени учитывается в исследованиях не полностью. Это объясняется в наибольшей степени тем, что минимумы и максимумы локальных спектров, равно как и формируемые ими цепочки, анализируются по отдельности, без учета их взаимосвязей и взаиморасположения.

Ясно, что области в пространстве  $(a, b)$ , где цепочки локальных максимумов и минимумов расположены достаточно близко друг к другу (исходя из выбранной меры оценки расстояния между ними), играют важную роль при анализе функционирования исследуемых органов или систем, так как они характеризуют изменение свойств изучаемого сигнала и, следовательно, представляют принципиально новую информацию о работе органов и систем, в частности, головного мозга.

Рассмотрим для примера вейвлет-диаграмму сигнала ЭЭГ с отмеченными на ней областями, в которых цепочки локальных максимумов и минимумов расположены близко друг к другу (рис. 1). Как хорошо видно из рисунка, ЦЛМ и ЦЛМин формируют области (часть из них отмечена окружностями), в которых расстояние между ними минимально, и, подчас, локальный минимум/минимумы или локальный максимум/максимумы соответствуют соседним (ближайшим) коэффициентам в матрице  $W^2(a, b)$ .

Такие участки пространства  $(a, b)$ , в которых ЦЛМ и ЦЛМин расположены достаточно близко друг к другу, назовём «областями сближения экстремумов» (ОСЭ).

Очевидно, что в этом случае мерой близости ЦЛМ и ЦЛМин будет минимально возможное расстояние между формирующими их экстремумами в пространстве  $(a, b)$ .

Рассмотрим результаты вычислительных экспериментов для выявления возможных ОСЭ, проведённых с

использованием модельных сигналов гармонического типа и «белого» и «цветного» шумов.

Итогом проведенных вычислительных экспериментов с модельными сигналами, результаты двух из которых представлены на рис. 2 и 3, является вывод о том, что наличие ОСЭ является характерным признаком сигналов, являющихся смесью большого количества компонент с разными частотами.

### Правила выделения областей сближения экстремумов

Важным моментом в анализе областей сближения экстремумов так же, как и при анализе цепочек локальных максимумов (или минимумов), является установление правил выделения участков пространства  $(a, b)$ , которые можно идентифицировать как ОСЭ.

Рассмотрим теоретические положения, с помощью которых будут сформулированы эти правила.

Пусть существует множество  $M^\alpha = \{m^\alpha_j\}$ , являющееся конечным упорядоченным набором элементов  $m^\alpha_j$  – локальных максимумов, где  $j$  – порядковый номер элемента во множестве  $M^\alpha$ ;  $j = 1, 2, \dots, q_1$ ;  $q_1$  – общее число локальных максимумов в матрице  $W^2(a, b)$ ; наличие верхнего индекса « $\alpha$ » обозначает принадлежность ко множеству локальных максимумов.

По аналогии, пусть существует множество  $M^\gamma = \{m^\gamma_j\}$ , являющееся конечным упорядоченным набором элементов  $m^\gamma_j$  – локальных минимумов, где  $j$  – порядковый номер элемента в множестве  $M^\gamma$ ;  $j = 1, 2, \dots, q_2$ ;  $q_2$  – общее число локальных минимумов в матрице  $W^2(a, b)$ ; верхний индекс « $\gamma$ » обозначает принадлежность ко множеству локальных минимумов.

Каждый элемент множеств  $M^\alpha$  или  $M^\gamma$  (т.е. локальный экстремум  $m_j$ ) характеризуется координатами в частотном пространстве  $a_j$ , во временном пространстве  $b_j$  ( $b$  – это время, порядковый номер отсчёта в сигнале или порядковый номер скейлограммы) и в энергетическом пространстве  $(W^2(a, b))$ .

На основе предыдущих исследований было получено [1-7], что локальные максимумы и минимумы формируют, соответственно, цепочки локальных максимумов и минимумов.

Отметим, что каждая ЦЛМ представляет собой подмножество  $M^{\alpha'}$  множества  $M^\alpha$ :

$$M^{\alpha'} = \{m^{\alpha}_1, m^{\alpha}_2, \dots, m^{\alpha}_{n_1}\} \subset M^\alpha, \quad (1)$$

где  $n_1$  – общее число локальных максимумов в определенной ЦЛМ.

Аналогично, каждая ЦЛМин представляет собой подмножество  $M^{\gamma'}$  множества  $M^\gamma$ :

$$M^{\gamma'} = \{m^{\gamma}_1, m^{\gamma}_2, \dots, m^{\gamma}_{n_2}\} \subset M^\gamma, \quad (2)$$

где  $n_2$  – общее число локальных минимумов в определенной ЦЛМин.

Следует обратить внимание на то, что элементы цепочки (локальные максимумы или минимумы) расположены в ней таким образом, что число соседей для каждого элемента равно двум для всех элементов, кроме тех, которые соответствуют началу или концу цепочки.

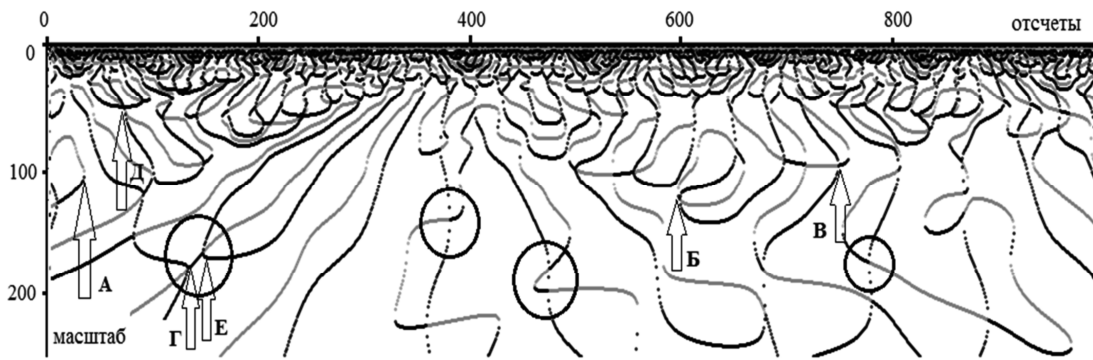


Рис. 1. Цепочки локальных минимумов (чёрного цвета) и локальных максимумов (серого цвета), полученные после обработки 5-секундной ЭЭГ для состояния покоя испытуемого. Использован вейвлет Morlet и отведение Oz по международной системе расположения электродов 10-20. По оси абсцисс отложен порядковый номер отсчёта, по оси ординат – масштаб вейвлет-преобразования. Замкнутыми линиями отмечены несколько областей пространства (a,b), содержащих ОСЭ

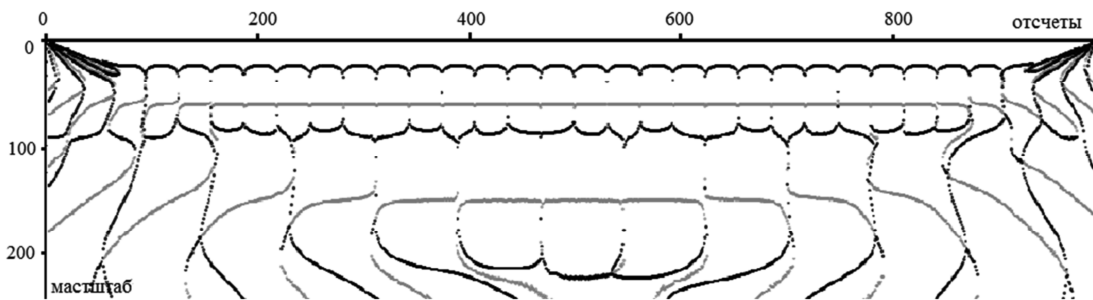


Рис. 2. Цепочки локальных минимумов (чёрного цвета) и локальных максимумов (серого цвета), полученные с применением модельного сигнала  $y = \sin(x/10) + \sin(x/25)$ , где  $x$  – порядковый номер отсчёта. Использован вейвлет Morlet. По оси абсцисс отложен порядковый номер отсчёта, по оси ординат – масштаб вейвлет-преобразования. Видно, что вне участков с крайними эффектами области сближения экстремумов (ОСЭ), практически, отсутствуют

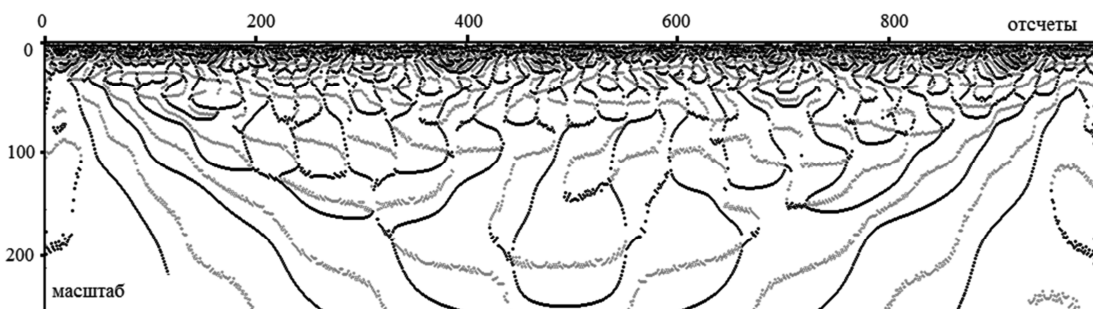


Рис. 3. Цепочки локальных минимумов (чёрного цвета) и локальных максимумов (серого цвета), полученные после обработки модельного сигнала, представляющего собой белый шум с единичной амплитудой. Использован вейвлет Morlet.

По оси абсцисс отложен порядковый номер отсчёта, по оси ординат – масштаб вейвлет-преобразования.

Наблюдается феномен формирования области сближения экстремумов (ОСЭ)

По результатам проведенных исследований на модельных и экспериментальных сигналах было предложено правило формирования ЦЛМ и/или ЦЛМин. Оно определяется значением логической функции  $f(a_i, b_j)$ :

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

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  $k/\Delta b \rightarrow 1$  и при наибольших для данного диапазона масштабов значений  $k$  (числа точек в ЦЛМ). Для вейвлетов Morlet и WAVE экспериментально были получены значения  $u=3$  и  $v=0.05$  [4].

Если функция  $f(a_i, b_j)$  (3) равна единице («истина»), то новый локальный максимум включается в конкретную ЦЛМ или ЦЛМин, а если она равна нулю («ложь»), то не включается.

Важно отметить, что это правило действует как при построении цепочек вдоль оси времени ( $b_s < b_n$ , где  $b_s$  – координата первого локального экстремума цепочки, а  $b_n$  – последнего), так и при построении цепочки против направления оси времени. При этом результаты выде-

ления ЦЛМ и ЦЛМин оказываются тождественными – они дают один и тот же эффект.

Обращает на себя внимание, что при реализации алгоритма на основе соотношения (3), ЦЛМ, выделенные в ходе анализа ЭЭГ, практически, всегда располагаются в пространстве  $(a, b)$  изолированно, не пересекаясь друг с другом. Иными словами, выполняется логическое условие:

$$(\exists(M_1^\alpha, \{m_\mu^\alpha, \dots, m_{\mu+n}^\alpha\})) \wedge (\exists(M_2^\alpha, \{m_\lambda^\alpha, \dots, m_{\lambda+o}^\alpha\})) \wedge, \quad (4)$$

$$\wedge(a_\mu > a_\lambda) \wedge (a_{\mu+n} > a_{\lambda+o}) = 1$$

где  $\mu$  и  $\lambda$  – порядковые номера локальных максимумов в двух разных ЦЛМ;  $n$  и  $o$  – суммарное число локальных максимумов в каждой из этих двух ЦЛМ;  $M_1^\alpha$  и  $M_2^\alpha$  – два подмножества локальных максимумов, формирующих первую и вторую ЦЛМ;  $a_\mu, a_\lambda, a_{\mu+n}, a_{\lambda+o}$  – масштабы соответствующих локальных максимумов.

В тоже время возможна ситуация, когда  $k/\Delta b < 1$ , т.е. число точек единичной ЦЛМ меньше, чем число локальных спектров между координатами  $b$  начальной и конечной точки цепочки. Это означает, что хотя бы один локальный максимум с координатами  $(a_m, b_m)$  имеет в качестве хотя бы одного соседа в локальном спектре с порядковым номером  $b_m \pm 1$  локальный спектр без максимума в окрестностях масштаба  $a_m$ . Данное состояние мы будем рассматривать как «разрыв ЦЛМ во временном пространстве».

Таким образом, теперь мы можем сформулировать **первое правило** выделения ОСЭ: «ОСЭ будут находиться либо у одного, либо у обоих концов ЦЛМ, либо в области разрыва ЦЛМ во временном пространстве». Значит, в локализации ОСЭ должны принимать участие начальные и конечные локальные максимумы ЦЛМ и локальные максимумы, ограничивающие разрыв, которые мы будем называть «опорными».

В тоже время, анализ локальных минимумов показывает, что ОСЭ могут находиться в любой точке ЦЛМин, а не только локализоваться у крайних (первых или последних) элементов цепочки.

Следовательно, можно сформулировать и **второе правило** выделения ОСЭ: «Чтобы сформировалась ОСЭ, к опорной точке ЦЛМ элементы ЦЛМин должны приблизиться на расстояние, меньшее некоторого порогового значения. При этом локальные экстремумы (в данном случае – минимумы) должны относиться, хотя бы к одной ЦЛМин». Иными словами, взяв большой временной диапазон  $\Delta t$  (или  $\Delta b$ ) для потенциально формирующейся ОСЭ и постепенно его уменьшая, можно добиться такого значения  $\Delta t$  ( $\Delta b$ ), при котором на минимальный отрезок времени будет приходиться только один экстремум локального спектра. При этом величина  $\Delta t/k$  будет стремиться к своему максимуму:  $\Delta t/k \rightarrow \max$  (или  $\Delta b/k \rightarrow \max$ ), где  $\Delta t$  – временной диапазон рассматриваемой области пространства  $(a, b)$  в окрестностях экстремумов ЦЛМ, выбранных в качестве опорных для построения ОСЭ по первому правилу;  $k$  – число как ло-

кальных минимумов, так и локальных максимумов.

Таким образом, результат выделения ОСЭ для случая одной ЦЛМ и одной ЦЛМин в пространстве  $(a, b)$  можно представить в виде логической функции:

$$f^{\alpha, \gamma}(a_\mu^\alpha, b_\mu^\alpha, a_\eta^\gamma, b_\eta^\gamma, n_1, n_2) = \begin{cases} 1, (\exists M^\alpha, \{m_\mu^\alpha(a_\mu^\alpha, b_\mu^\alpha), \dots, m_{\mu+n_1}^\alpha(a_{\mu+n_1}^\alpha, b_{\mu+n_1}^\alpha)\}) \wedge \\ (\exists M^\gamma, \{m_\eta^\gamma(a_\eta^\gamma, b_\eta^\gamma), \dots, m_{\eta+n_2}^\gamma(a_{\eta+n_2}^\gamma, b_{\eta+n_2}^\gamma)\}) \\ 0, (\exists M^\alpha, \{m_\mu^\alpha(a_\mu^\alpha, b_\mu^\alpha), \dots, m_{\mu+n_1}^\alpha(a_{\mu+n_1}^\alpha, b_{\mu+n_1}^\alpha)\}) \vee \\ (\exists M^\gamma, \{m_\eta^\gamma(a_\eta^\gamma, b_\eta^\gamma), \dots, m_{\eta+n_2}^\gamma(a_{\eta+n_2}^\gamma, b_{\eta+n_2}^\gamma)\}), \end{cases} \quad (5)$$

где  $\eta$  – порядковые номера локальных минимумов в ЦЛМин;  $n_1$  – число локальных максимумов, формирующих ЦЛМ;  $n_2$  – число локальных минимумов, формирующих ЦЛМин.

Таким образом, на первом этапе поиска ОСЭ необходимо выполнение условия существования хотя бы одной ЦЛМ и одной ЦЛМин.

Существование ЦЛМ автоматически означает наличие первого и последнего локального максимума этой цепочки на оси времени.

На втором этапе поиска и построения ОСЭ проверяется наличие разрывов у ЦЛМ во временной области.

Введем логическую функцию, определяющую существование у ЦЛМ разрывов во временной области:

$$f_r(M^\alpha) = \begin{cases} 1, k/\Delta b < 1 \\ 0, k/\Delta b = 1 \end{cases} \quad (6)$$

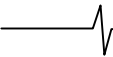
Эта функция нужна для определения того, будут ли включены в число опорных точек только начальные и конечные точки единичной ЦЛМ или будут использованы и точки, ограничивающие разрыв во временном пространстве.

**Третьим** и завершающим условием построения ОСЭ будет наличие вблизи опорной точки точек локальных минимумов и/или других максимумов, формирующих иные (любые другие) ЦЛМ и/или ЦЛМин. В качестве опорной точки будет выступать, согласно первому правилу построения ОСЭ, либо начальная и/или конечная точка ЦЛМ, либо одна из точек, ограничивающих разрыв цепочки во временной области.

Введем логическую функцию  $f_p(a_i^\alpha, b_i^\alpha, a_\eta^\gamma, b_\eta^\gamma)$ , отражающую результат принятия решения о том, находится ли данная точка пространства  $(a, b)$  достаточно близко к опорной точке потенциальной ОСЭ. В качестве пример рассмотрим точку ЦЛМин с координатами  $(a_\eta^\gamma, b_\eta^\gamma)$ , а в качестве опорной точки – начальную  $(a_i^\alpha, b_i^\alpha)$  точку ЦЛМ:

$$f_p(a_i^\alpha, b_i^\alpha, a_\eta^\gamma, b_\eta^\gamma) = \begin{cases} 1, (a_\eta^\gamma \in [(a_i^\alpha - (va_i^\alpha + u)), (a_i^\alpha + (va_i^\alpha + u))]) \wedge \\ (b_\eta^\gamma \in [(b_i^\alpha - (vb_i^\alpha + u)), (b_i^\alpha + (vb_i^\alpha + u))]); \\ 0, (a_\eta^\gamma \notin [(a_i^\alpha - (va_i^\alpha + u)), (a_i^\alpha + (va_i^\alpha + u))]) \vee \\ (b_\eta^\gamma \notin [(b_i^\alpha - (vb_i^\alpha + u)), (b_i^\alpha + (vb_i^\alpha + u))]); \end{cases} \quad (7)$$

где верхний индекс « $\alpha$ » означает принадлежность переменной к локальным максимумам, индекс « $\gamma$ » – принадлежность переменной к локальным минимумам;  $a$  и  $b$  –



координаты соответствующих элементов  $m^\gamma$  и  $m^\alpha$ .

Значение функции  $f_p(a_i^\alpha, b_i^\alpha, a_\eta^\gamma, b_\eta^\gamma, n_1, n_2)$ , равное «1» или «истина», будет означать, что точка может быть включена в область пространства ОСЭ, а «0» или «ложь» – что эта точка не может быть включена.

В итоге, логическая функция  $f_{res}$  принятия решения об отнесении участка пространства  $(a, b)$  к ОСЭ будет выражаться как:

$$f_{res}(a_i^\alpha, b_i^\alpha, a_\eta^\gamma, b_\eta^\gamma, n_1, n_2) = \begin{cases} 1, (f^{\alpha, \gamma}(a_\mu^\alpha, b_\mu^\alpha, a_\eta^\gamma, b_\eta^\gamma, n_1, n_2) = 1) \wedge \\ \wedge (f_p(a_i^\alpha, b_i^\alpha, a_\eta^\gamma, b_\eta^\gamma) = 1); \\ 0, (f^{\alpha, \gamma}(a_\mu^\alpha, b_\mu^\alpha, a_\eta^\gamma, b_\eta^\gamma, n_1, n_2) = 0) \vee \\ \vee (f_p(a_i^\alpha, b_i^\alpha, a_\eta^\gamma, b_\eta^\gamma) = 0). \end{cases} \quad (8)$$

При этом, если  $f_r(M^\alpha) = 0$  (см.(6)), то рассматриваются только начальная и конечная точка ЦЛМ как потенциальные области ОСЭ, если же  $f_r(M^\alpha) = 1$ , то принимаются во внимание начальные и конечные точки ЦЛМ, а также и точки, ограничивающие участок разрыва цепочки во временной области.

#### Типологизация областей сближения экстремумов

Рассмотрим правила типологизации ОСЭ.

Как показывает опыт, возможность разделить выделенные ОСЭ на определённые типы позволяет повысить чувствительность и специфичность методов оценки состояния испытуемого по данным ЭЭГ, в сравнении с использованием только нативных данных, а также применять методы классификации и Data Mining [9] для выявления не известных ранее закономерностей в изучаемых системах: нервной, сердечно-сосудистой и др.

1. По характеру развития ЦЛМ и ЦЛМин во времени ОСЭ можно разделить на три группы:

а) итоговые. Данный тип ОСЭ характеризуется тем, что в области пространства  $(a, b)$  ОСЭ завершаются и ЦЛМ, и ЦЛМин (рис. 1, стрелка А).

б) начальные. Данный тип ОСЭ характеризуется тем, что в области пространства  $(a, b)$  ОСЭ начинаются и ЦЛМ, и ЦЛМин (рис. 1, стрелка Б).

в) промежуточные. Для данного типа характерно «прохождение» через ОСЭ ЦЛМин, при том, что ЦЛМ могут как начинаться, так и заканчиваться в данной области пространства  $(a, b)$  (рис. 1, стрелка В).

2. По числу ЦЛМ и ЦЛМин, формирующих ОСЭ. Нетрудно заметить, что эта классификация даёт весьма большое количество вариантов, поскольку как ЦЛМ, так и ЦЛМин могут в значительных количествах (до 5-6 цепочек) формировать ОСЭ (рис. 1, стрелка Д).

3. По отношению числа входящих и выходящих из области ОСЭ ЦЛМ и ЦЛМин. Как и в предыдущем критерии классификации в силу сложной частотной картины сигнала ЭЭГ возможен весьма широкий диапазон имеющих показателей (от 0 до 6-7), отражающих как число входящих в данное ОСЭ ЦЛМ и ЦЛМин, так и число ЦЛМ и ЦЛМин, покидающих данную область (смотреть, например, рис. 1, стрелки Г и Е).

4. По типу ЦЛМ и ЦЛМин, формирующих ОСЭ. По-

скольку как для ЦЛМ, так и для ЦЛМин выявлено 5 частотных и 5 энергетических типов динамики поведения во времени, то можно использовать эти показатели для классификации формируемой ОСЭ.

5. По типу соседних ОСЭ. Действительно, поскольку одним из неотъемлемых элементов ОСЭ является первый или последний элемент ЦЛМ, то, возможно, что одна ЦЛМ может участвовать в формировании двух ОСЭ, один из которых появился в более ранний период времени. Аналогично, ЦЛМин, формирующая ОСЭ, может «проходить» через несколько таких областей. При этом ЦЛМ может продолжаться в одну соседнюю ОСЭ, а ЦЛМин – в другую, формируя таким образом сеть ОСЭ.

Таким образом, в результате применения этих правил типологизации может быть классифицирована большая часть разнообразных феноменов, связанных с выделенным эффектом ОСЭ, что позволяет сформировать широкий спектр входных параметров для статистической обработки исследуемых биомедицинских сигналов.

#### Оценка характеристик процессов, происходящих в органах и системах человека, на основе анализа областей сближения экстремумов

Рассмотрим пример получения частот встречаемости разных типов ЦЛМ и ЦЛМин при оценке ОСЭ.

Объектом исследования были зрительные вызванные потенциалы (ЗВП) головного мозга, которые регистрировались в ходе фотостимуляции. Эксперименты проводились с 21-м испытуемым обоего пола в возрасте от 19 до 24 лет. ЗВП были получены при частоте фотостимуляции 2.5 Гц, стимулирующий фотодиод располагался на расстоянии 1 м от глаз испытуемых. Регистрация ЗВП осуществлялась электроэнцефалографом «Нейрон-Спектр 4-ВП» в отведении ОЗ с частотой дискретизации 5 кГц.

Вызванный потенциал определялся путём когерентного накопления сигнала при не менее чем 300 фотостимуляциях. Результаты выделения ЗВП и контрольного эксперимента подвергались непрерывному вейвлет-преобразованию с использованием вейвлетов Morlet и по ним были получены значения элементов матрицы квадратов вейвлет-коэффициентов.

На рис 4. представлены характерные результаты сравнения частот встречаемости разных типов ЦЛМ и ЦЛМин, формирующих ОСЭ для ЗВП и контрольной группы. Полученные результаты продемонстрировали значимое различие по энергетическим составляющим как для цепочек локальных минимумов, так и максимумов, а для первых – ещё и значимое различие в структуре частотных типов (для критерия  $\chi^2$ :  $p < 0.001$  при общем числе проанализированных цепочек – более 5 тысяч с одного испытуемого).

#### Заключение

Таким образом, в настоящей работе предложен метод анализа биомедицинских сигналов на примере ЭЭГ, основанный на оценке структур, образованных в результате «взаимодействия» цепочек локальных максимумов – ЦЛМ и цепочек локальных минимумов – ЦЛМин в пространстве  $(a, b)$  «масштаб вейвлет-преобразования – время». Разработаны алгоритмы детектирования таких

структур, названных «областями сближения экстремумов» – ОСЭ. Проведенные вычислительные эксперименты с различными типами модельных сигналов (моночастотные гармоники, суммы нескольких гармонических сигналов, амплитудно модулированные гармоники, «белые» и «цветные» шумы) продемонстрировали, что формирование ОСЭ связано с феноменом дрейфа ЦЛМ и ЦЛМин в частотном пространстве. Продемонстрирован ряд подходов для обработки результатов исследования на примере ЗВП, а также определен подход к классификации выявленных феноменов ЭЭГ.

Полученный метод может быть в дальнейшем применен для изучения широкого спектра сигналов медико-биологической природы. Это позволит существенно расширить номенклатуру выявляемых феноменов при анализе биомедицинских сигналов и, в конечном итоге, поднять общую информативность клинко-физиологических исследований.

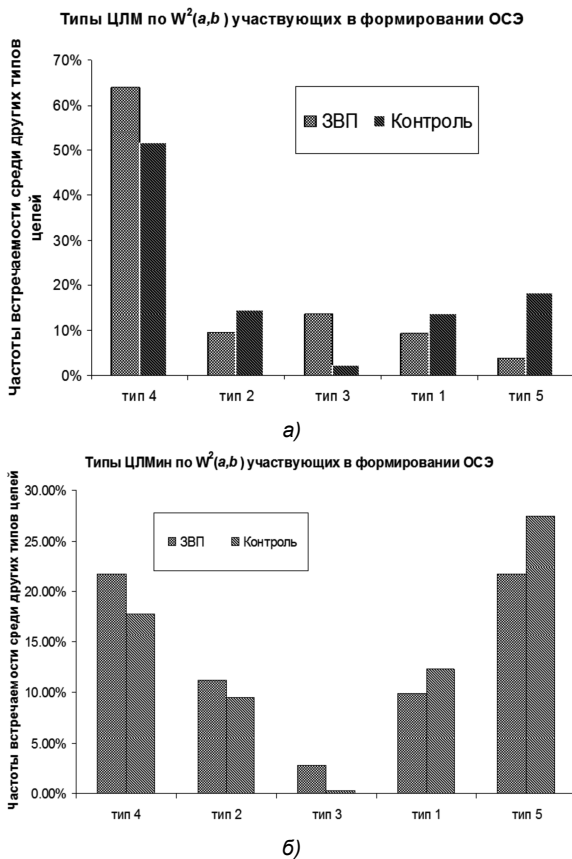


Рис. 4. Типичные результаты по частотам встречаемости ЦЛМ различных энергетических типов: а – за 100% приняты общие числа ЦЛМ отдельно для контроля и отдельно для группы ЗВП; б – за 100% приняты общие числа ЦЛМин отдельно для контроля и отдельно для группы ЗВП. 33% от общего числа ЦЛМин приходится на долю не указанных на графике ЦЛМин, состоящих только из одного минимума

### Литература

1. Туровский Я.А. Программа PikWave 1.0. Зарегистрирована в Российском агентстве по патентам и товарным знакам, регистрационный № 2006613500.

2. Туровский Я.А., Семёнов А.Г., Киселева Е.В., Хороших Н.В. Программа Wavemax 1.0. Зарегистрирована в Российском агентстве по патентам и товарным знакам, регистрационный № 2012614720.

3. Туровский Я.А., Кургалин С.Д., Вахтин А.А. Обработка сигнала электроэнцефалограммы на основе анализа частотных зависимостей и вейвлет-преобразования // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2012. – № 12. – С. 39-45.

4. Туровский Я.А., – 2012. – Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Системный анализ и информационные технологии. – 2013. – №2. – С. 69-73.

5. Туровский Я.А., Кургалин С.Д., Максимов А.В. Моделирование процесса выделения частотных локальных минимумов в сигналах электроэнцефалограмм // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2012. – Т. 18, № 4. – С. 827-834.

6. Туровский Я.А., Кургалин С.Д., Семёнов А.Г. Анализ энцефалограмм на основе исследования цепочек локальных максимумов скейлограмм // Цифровая обработка сигналов. – 2013. – №2. – С. 20-23.

7. Туровский Я.А., Кургалин С.Д., Семёнов А.Г. Динамика энергетических показателей цепочек локальных максимумов вейвлет-коэффициентов биомедицинских сигналов // Цифровая обработка сигналов. – 2013. – №2. – С. 24-29.

8. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. – 1996. – Т. 166, № 11. – С. 1145-1170.

9. Чубукова И. А. Data Mining: учебное пособие. – М.: Интернет-университет информационных технологий: БИНОМ: Лаборатория знаний, 2006. – 382 с.

### ESTIMATION METHOD FOR LOCAL EXTREMA INTERACTION OF MATRIXES OF COEFFICIENTS IN CONTINUOUS WAVELET TRANSFORMATION OF ELECTROENCEPHALOGRAM SIGNALS

*Turovsky Y.A., Kurgalin S.D., Semyonov A.G.*

This paper offers an analysis method for biomedical signals, demonstrated on the example of EEG, and based on estimations of structures, which were shaped as a result of «interaction» between local maximums chains (LMC) and local minimums» dimension. There are detecting algorithms of such structures, called «areas of extremes' convergence» (AEC), worked out. The computing experiments accomplished with different types of model signals (monofrequency harmonics, sums of harmonic signals, amplitude-modulated harmonics, white and colored noises) showed that shaping of AEC is closely related to a phenomenon of LMC and LMinC drift in frequency domain. We demonstrated an approach to the processing of the survey results for visual evoked potentials of the brain, and defined a way to classify the identified EEG phenomena.