

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫЗВАННЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ ГОЛОВНОГО МОЗГА НА ОСНОВЕ АДАПТИВНОГО ВАРИАНТА ОБРАТНОГО ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

© 2015 г. Я.А. Туровский, С.Д. Кургалин, А.А. Вахтин,
С.В. Борзунов, В.А. Белобродский

Факультет компьютерных наук Воронежского государственного университета,
394006, Воронеж, Университетская пл., 1;

E-mail: yaroslav_turovsk@mail.ru

Поступила в редакцию 22.01.15 г.

Предложен метод исследования вызванных потенциалов головного мозга, основанный на оценке структуры цепочек локальных максимумов, полученных из матрицы квадратов коэффициентов вейвлет-преобразования вызванных потенциалов. Представлен общий подход к анализу вызванных потенциалов, обеспечивающий формирование и выделение цепочек локальных максимумов и минимумов матрицы квадратов коэффициентов вейвлет-преобразования этих потенциалов. Описаны алгоритмы адаптивного восстановления элементов вызванных потенциалов после прямого вейвлет-преобразования на основе полученных областей в пространстве «масштаб вейвлет-преобразования – время», отражающих отдельные элементы компонентов этих потенциалов. При реализации метода для оценки зрительных вызванных потенциалов установлено, что их компоненты формируются не менее чем двумя–тремя элементами, представляющими собой отдельные частотно-временные области. Данные области, на основе которых адаптивно восстанавливались элементы вызванных потенциалов, имеющие свое определенное латентное время и амплитудные характеристики, могут представлять и самостоятельное клинко-физиологическое значение. Продемонстрирована устойчивость предложенного метода к изменению применяемой в анализе вейвлет-функции: при использовании вейвлетов Morlet и WAVE получены сходные результаты. Разработанный метод применен для анализа устойчивых зрительных вызванных потенциалов, возникающих при фотостимуляции. При этом было отмечено наличие, наряду с основным элементом, соответствующем частоте фотостимуляции, и других, не присутствующих постоянно в спектре устойчивых зрительных вызванных потенциалов.

Ключевые слова: электроэнцефалограмма, вейвлет-анализ, локальный спектр, цепочка локальных максимумов, вызванный потенциал головного мозга.

Изучение вызванных потенциалов (ВП) головного мозга занимает значимое место в нейронауках, представляя широкий спектр данных относительно функционирования тех или иных систем мозга [1,2]. Традиционно, основную клинко-физиологическую информацию из ВП извлекают, анализируя параметры амплитуды и латентного времени его компонентов [1,3], хотя предпринимаются и попытки трехмерной локализации отдельных компонентов ВП (см., к примеру, [4]). В этих подходах нельзя не отметить очевидное снижение информативности анализа получаемой информации по сравнению со случаем, когда номенклатура исследуемых

параметров ВП шире, чем только латентное время и амплитуда ВП. Действительно, компоненты ВП с одними и теми же параметрами амплитуды и латентности могут иметь разную форму, потенциально несущую полезную информацию, которую можно использовать в научных целях и в клинической практике. Попытки применить методы спектрального анализа к оценке ВП, в целом, не нашли пока широкого распространения. Бóльшее распространение в настоящее время получили методы спектрального анализа в системах оценки ВП в рамках так называемого «синхронного нейрокомпьютерного интерфейса». Данный тип нейрокомпьютерных интерфейсов (синоним интерфейса «мозг–компьютер») основан на детекции особенностей ВП с «привязкой» выявленных особенностей к тем или иным командам, подаваемым внешним устройствам [5–7]. Так,

Сокращения: ВП – вызванные потенциалы, ЗВП – зрительные вызванные потенциалы, ЦЛМ – цепочки локальных максимумов, ЦЛМин – цепочки локальных минимумов.

вейвлет-преобразование было применено для улучшения параметров работы нейрокомпьютерного интерфейса на основе когнитивного потенциала P300 [8]. Необходимость детектировать именно временную локализацию потенциала P300 затрудняет применение в этой области преобразования Фурье. Существенно большее распространение получило использование преобразование Фурье для детекции устойчивых зрительных вызванных потенциалов (устойчивых ЗВП, Steady-State Visual Evoked Potential – SSVEP), служащих электрофизиологической основой соответствующих нейрокомпьютерных интерфейсов [5,6]. Однако такие подходы носят в основном феноменологический характер, когда различным компонентам ВП сопоставляются те или иные команды для внешних устройств-эффекторов. Иными словами, не всегда учитывается содержательная, нейрофизиологическая интерпретация используемых феноменов ВП. Важно отметить значимость наличия медико-биологической интерпретации математических преобразований, применяемых для анализа ВП. Действительно, используя свертку исходного сигнала (в нашем случае – ВП) с разными анализирующими функциями, можно, в общем случае, получить существенно различающиеся результаты. Таким образом, актуальной представляется разработка метода анализа структуры ВП, основанного на предположении о формировании компонентов ВП из различных по амплитуде и латентности элементов, порожденных как различными пулами нейронов, так и результатом их взаимодействия. Логичным представляется использование для этого аппарата вейвлет-анализа, хорошо зарекомендовавшего себя при обработке медико-биологических нестационарных сигналов самой различной природы [9–11]. Итогом прямого непрерывного вейвлет-преобразования является матрица коэффициентов вейвлет-преобразования $W(a,b)$, квадраты элементов которой $W^2(a,b)$ отражают распределение энергии сигнала по масштабам вейвлет-преобразования [12].

В серии работ [10,13,14] продемонстрирован факт существования в структуре матрицы $W^2(a,b)$ цепочек локальных максимумов (ЦЛМ) и минимумов (ЦЛМин), отражающих соответственно максимальные и минимальные значения энергии сигнала в заданном отрезке времени, проведена классификация данных феноменов и продемонстрирована их связь с различными состояниями мозговой активности. В свете сказанного выше представляется актуальной модификация алгоритма обратного вейвлет-преобразования на основе данных о параметрах

ЦЛМ и/или ЦЛМин матрицы $W^2(a,b)$ для детализации компонентов ВП различной природы, что позволит восстанавливать элементы ВП, исходя из частотно-временных особенностей самих вызванных потенциалов. Иными словами, процесс восстановления элементов ВП с использованием математического аппарата вейвлет-преобразования должен быть адаптирован к свойствам исследуемых ВП.

Целью данной работы является разработка метода разложения ВП на элементы на основе обратного вейвлет-преобразования, исходя из структуры цепочек локальных максимумов и минимумов элементов матрицы $W^2(a,b)$, и проведение с его использованием исследования ЗВП и устойчивых ЗВП человека.

В предлагаемом методе применяется непрерывное вейвлет-преобразование ВП, результатом которого является матрица коэффициентов $W^2(a,b)$, где a – масштаб вейвлет-преобразования (величина, обратная частоте); b – сдвиг анализирующего вейвлета по оси времени t . Матрица дает зависимость «энергии» от времени (b) и частоты ($\sim 1/a$), позволяет провести расчет локальных спектров исследуемого сигнала [14], получить ЦЛМ и ЦЛМин и исследовать их структуру.

Будем применять троичную логику и введем в рассмотрение логическую функцию $f(a_i, b_j)$, характеризующую решение о включении или не включении новой точки локального экстремума в уже существующие ЦЛМ или ЦЛМин (для локальных максимумов и минимумов соответственно), где индексы $i = 1, 2, \dots$ и $j = 1, 2, \dots$ нумеруют текущие координаты локального экстремума, потенциально принадлежащего той или иной ЦЛМ (или ЦЛМин). При реализации алгоритма эта функция на первом шаге алгоритма принимает значение, соответствующее отсутствию подходящей точки для добавления в ЦЛМ или ЦЛМин, т.е. $f(a_i, b_j) = null$. На следующем шаге алгоритма проверяется, находится ли хотя бы одна точка максимума (минимума) локального спектра (скейлограммы) в частотном или временном диапазоне, отвечающем критерию близости к последней по времени включения точке цепочки с координатами (a_{i-1}, b_{j-1}) ($a_i \in [a_{i-1} - (va_s + u), a_{i-1} + (va_s + u)] \vee (b_j \in [b_{j-1}, b_{j-1} + (va_s + u)]$, где a_{i-1} – масштаб локального максимума для концевой точки формирующейся ЦЛМ или ЦЛМин; b_{j-1} – время (или номер отсчета, номер скейлограммы) для концевой точки формирующейся ЦЛМ (ЦЛМин); s – индекс, обозначающий начальную точку формирующейся ЦЛМ или ЦЛМин; a_s – значение масштаба первой

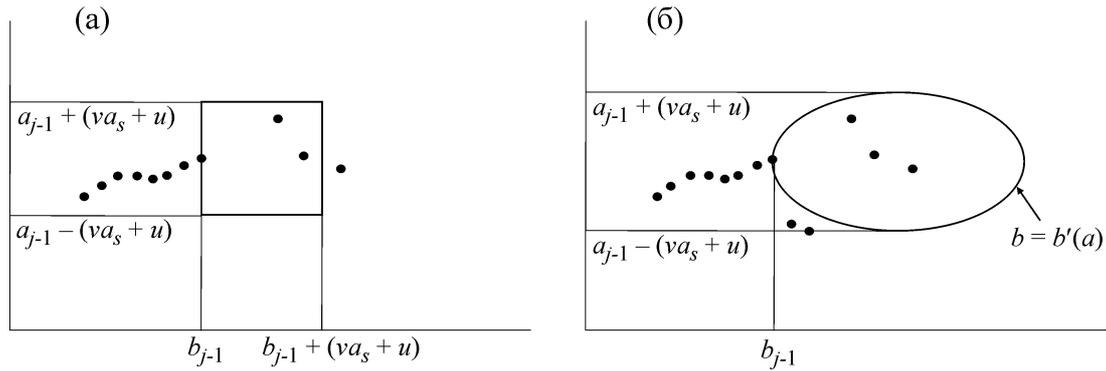


Рис. 1. (а) – Графическое представление прямоугольной области (a,b) , в которой осуществляется поиск точек локальных экстремумов для формирования ЦЛМ или ЦЛМин. (б) – Обобщенное представление для формирования области (a,b) , в которой осуществляется поиск локальных экстремумов для формирования ЦЛМ или ЦЛМин.

точки формирующейся ЦЛМ или ЦЛМин. Для рассматриваемого здесь случая $f(a_i, b_j) = false$. Константы u и v , необходимые для расчета значений $f(a_i, b_j)$, были получены эмпирически [14,15] для данного типа сигналов. И на заключительном шаге работы алгоритма, если потенциально новая точка цепочки с координатами (a_i, b_j) удовлетворяет условиям $(a_i \in [a_{i-1} - (va_s + u), a_{i-1} + (va_s + u)]) \wedge (b_j \in (b_{j-1}, b_{j-1} + (va_s + u)))$, то логическая функция $f(a_i, b_j)$ становится равной «true» и такая точка максимума (минимума) локального спектра (скейлограммы) включается в ЦЛМ (если это точка максимума) или в ЦЛМин (если это точка минимума).

Обратим внимание, что параметр b в нашем методе расчета безразмерен, поскольку он представляет собой номер отсчета мгновенной амплитуды сигнала, полученного с аналого-циф-

рового преобразователя, а в размерность времени его значения переводятся путем умножения на частоту дискретизации сигнала. Аналогично, параметр a , являясь масштабом вейвлет-преобразования (его размерность: 1/частота), может быть сведен к числу отсчетов за период одной осцилляции исследуемого сигнала. Зная частоту дискретизации сигнала, нетрудно получить величину значений частот в герцах.

Выше был представлен критерий включения или не включения точек локальных экстремумов в ЦЛМ или ЦЛМин при выборе потенциально новой точки цепочки из прямоугольной области (рис. 1а). В общем же случае (рис. 1б) для любой выпуклой области в пространстве (a,b) логическая функция определения наличия потенциально новой точки локального экстремума в ЦЛМ или ЦЛМин будет иметь вид:

$$f(a_i, b_j) = \begin{cases} 1, & (a_i \in [a_{i-1} - (va_s + u), a_{i-1} + (va_s + u)]) \wedge (b_j \in (q_1(a_i), q_2(a_i))) \\ 0, & (a_i \notin [a_{i-1} - (va_s + u), a_{i-1} + (va_s + u)]) \vee (b_j \notin (q_1(a_i), q_2(a_i))) \end{cases} \quad (1)$$

где $q_1(a)$ и $q_2(a)$ могут быть параболической или степенной функцией или иметь иной вид, отвечающий условию формирования в пространстве (a,b) выпуклой области.

Однако возможна ситуация, при которой в выбранной области находятся две или более точек локальных экстремумов, каждая из которых может стать следующей для включения в формирующуюся ЦЛМ или ЦЛМин. В этом случае задается правило, по которому определяется, какая из точек локальных экстремумов имеет больший приоритет при ее включении в ЦЛМ или ЦЛМин. Введем параметр приоритета:

$$p = \begin{cases} 1, & a^{(p)} \gg b^{(p)} \\ 0, & a^{(p)} \ll b^{(p)} \end{cases}$$

принимаяющий логические значения «истина» при превышении значений параметра частоты $a^{(p)}$ над значениями параметра времени $b^{(p)}$, или «ложь» – в противном случае. Иными словами, соотношение $a^{(p)} \gg b^{(p)}$ показывает, что разница частот последней по времени включения точкой формирующейся ЦЛМ (ЦЛМин) и точкой, относительно которой принимается решение о ее включении в ЦЛМ (ЦЛМин), существенно более значима, чем их разница по времени. Соотношение $a^{(p)} \ll b^{(p)}$ приводит к

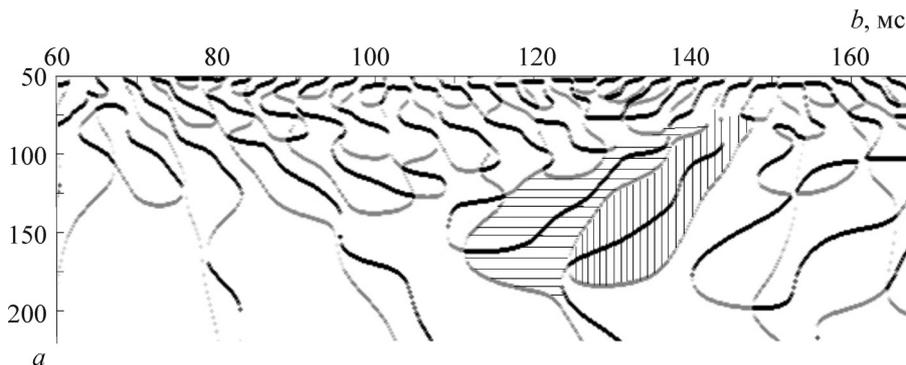


Рис. 2. Значения элементов матрицы $W^2(a,b)$ при использовании вейвлета Morlet для анализа зрительных ВП. По оси абсцисс – латентное время b , по оси ординат – масштаб вейвлет-преобразования a . Черные линии – ЦЛМ, серые – ЦЛМин. Вертикальной и горизонтальной штриховками показаны две области $W^2_i(\Delta a_i, \Delta b_i)$, участвующие в формировании компонента ВП с латентностью 120–140 мс.

противоположной ситуации. Следовательно, для каждой точки, потенциально включаемой в ЦЛМ (ЦЛМин), можно задать «функцию расстояния»:

$$L_i^{(p)}(a_i, b_j) = |a_i - a_{i-1}|p + |b_i - b_{i-1}|(1 - p),$$

где индекс i , как и ранее, указывает на текущее значение локального экстремума, потенциально принадлежащего той или иной ЦЛМ (или ЦЛМин).

Эта функция будет давать «расстояние» между последней по времени точкой формирующейся ЦЛМ (ЦЛМин) и точкой, относительно которой принимается решение о ее включении в ЦЛМ (ЦЛМин). При этом в ЦЛМ (ЦЛМин) включается точка, для которой значение функции $L_i^{(p)}(a_i, b_j)$ минимально по сравнению со значениями этой функции для других точек, попавших в область пространства (a,b) , описываемую функцией (1).

Согласно описанной выше последовательности шагов формируются ЦЛМ, окруженные ЦЛМин, начинающиеся и заканчивающиеся в разных областях сближения экстремумов матрицы $W^2(a,b)$, в которых различные ЦЛМ и/или ЦЛМин сближаются на расстояния, менее задаваемого в ходе исследования [16]. Таким образом, в пространстве (a,b) формируется область $W^2_i(\Delta a_i, \Delta b_i)$ (см. рис. 2), где i нумерует рассматриваемые области, Δa_i – разность между максимальными и минимальными значениями масштаба a для i -й области, Δb_i – длительность по времени для i -й области.

Рассмотрим область $W^2_i(\Delta a_i, \Delta b_i)$ как множество точек на поверхности (a,b) . Все исследуемое частотно-временное пространство, содержащее паттерн ВП, можно определить как:

$$W^2(\Delta a, \Delta b) = \bigcup_{i=1}^m W^2_i(\Delta a_i, \Delta b_i) \quad (3)$$

где m – последний по времени элемент множества $W^2(\Delta a, \Delta b)$ на отрезке Δb ; $\Delta a = \Delta a_1 \cup \Delta a_2 \cup \dots \cup \Delta a_m$; $\Delta b = \Delta b_1 \cup \Delta b_2 \cup \dots \cup \Delta b_m$; Δa – частотный диапазон области $W^2(\Delta a, \Delta b)$; Δb – временной диапазон этой же области.

Полученные ЦЛМ и ЦЛМин формируют области $W^2_i(\Delta a_i, \Delta b_i)$, при этом $\forall i, j (W^2_i((\Delta a_i, \Delta b_i)) \cap W^2_j(\Delta a_j, \Delta b_j) = \emptyset), i \neq j$.

Рассмотрим теперь, как можно определить элементы ВП, формирующие компоненты известной амплитуды и латентности. Для этого достаточно провести обратное вейвлет-преобразование [12] для тех величин $W_i(\Delta a_i, \Delta b_i)$, которые находятся во временной области анализируемого элемента ВП. Так, для оценки элементов компонента ЗВП с латентностью ≈ 120 мс необходимо провести обратное вейвлет-преобразование для областей $W^2_i(\Delta a_i, \Delta b_i)$, чьи ЦЛМ содержат локальные максимумы с этим латентным временем. На примере, представленном на рис. 2, видно, что к ним относятся, помимо остальных, и две заштрихованные области. Данный подход позволяет определить во временной области сигнал, формирующий именно выделенную особенность в частотно-временном пространстве. Таким образом, каждый из амплитудно-временных компонентов ВП любой природы можно разложить на ряд элементов. Причем такое разложение адаптируется к частотно-временным особенностям ВП, т.е. оно осуществляется не по одному и тому же семейству базисных функций, как в случае вейвлет-преобразования или преобразования Фурье, а по адаптивно рассчитанным функциям, несущим

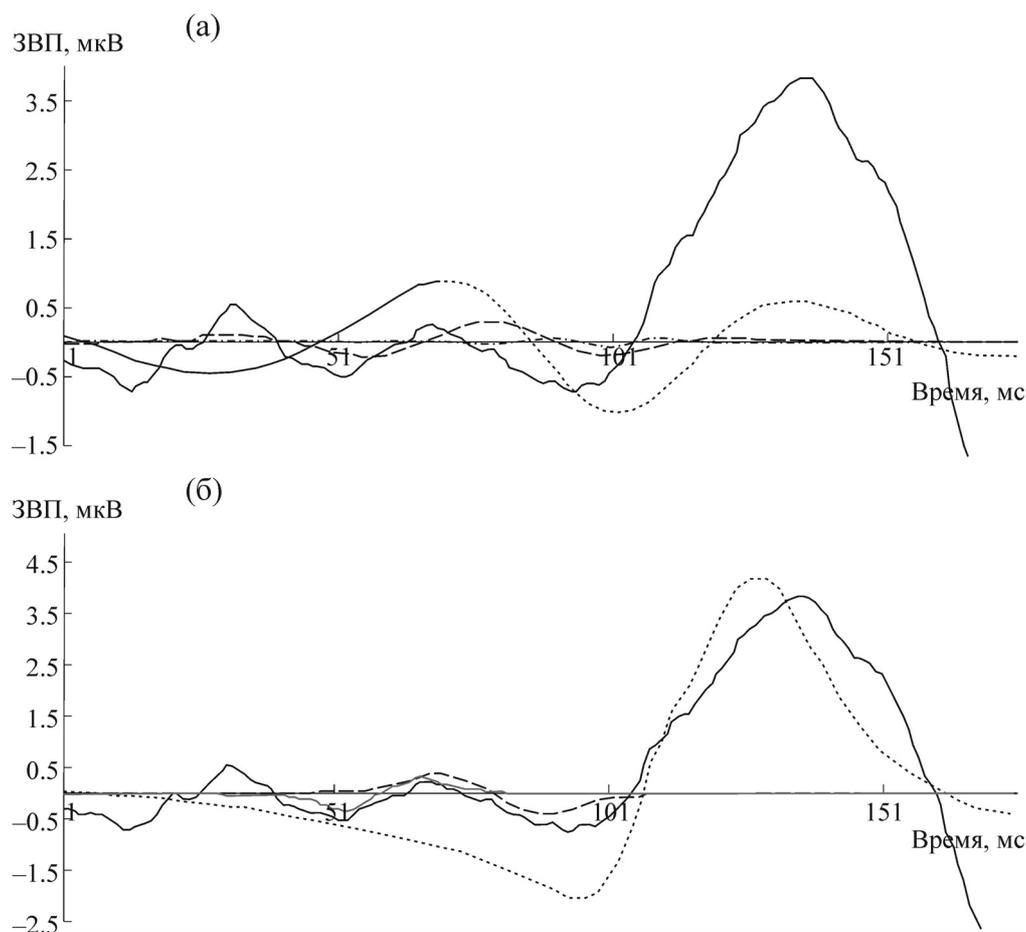


Рис. 3. Зависимости ЗВП (черная сплошная линия) от времени с выделением элементов, формирующих компоненты зрительного ВП с латентностью ≈ 50 мс, ≈ 60 мс и ≈ 90 мс, при использовании вейвлета Morlet (а) и вейвлета WAVE (б). Штриховой, штрих-пунктирной и серой сплошной линией показаны восстановленные элементы компонентов ЗВП с указанной латентностью.

щим информацию о наиболее выраженных энергетических компонентах исследуемого ВП. При этом для новых функций, так же как и для традиционных компонентов ВП, будут актуальными и параметры латентности, и параметры амплитуды выявленных элементов.

Пример восстановления ЗВП, представленный на рис. 3, показывает, что положительный компонент ЗВП с латентностью ≈ 65 мс формируется не менее чем двумя областями $W^2_i(\Delta a_i, \Delta b_i)$, которые разнесены по времени расположения максимумов своих амплитуд. Исследование ЗВП у девяти добровольцев показало, что компоненты ЗВП, традиционно анализируемые как единое целое [1,3], с точки зрения спектрального анализа на основе вейвлет-преобразования представляют собой сумму не менее чем двух–трех элементов. Применение в расчетах двух разных типов вейвлетов (Morlet и WAVE) подтвердило эти выводы, что позволяет рассматривать элементы компонентов ВП,

выявленные на основе анализа ЦЛМ и ЦЛМин, как нейрофизиологические компоненты ВП, а не артефакты, возникающие при математической обработке результатов.

Применим описанный выше метод для исследования потенциалов устойчивых ЗВП (SSVEP). Этот ВП возникает в ответ на фотостимуляцию с определенной частотой и представляет собой периодический электрофизиологический процесс той же частоты с фокусом в затылочной коре больших полушарий. Большим интересом данный ВП вызывает в связи с разработкой новых типов нейрокомпьютерных интерфейсов, обеспечивая наиболее высокую в настоящее время скорость их работы [5,17].

Для выявления элементов устойчивых ЗВП при работе с интерфейсом «мозг–компьютер» регистрировали данные с пяти добровольцев правой мужского пола. Испытуемые, находясь в удобном положении, в соответствии с зада-

нием должны были перемещать курсор на экране монитора. При этом они смотрели на один из мигающих с заданной частотой светодиодов, расположенных по сторонам экрана. Частоты фотостимуляции составили 9,61, 10,64, 11,63 и 12,82 Гц. Задание и стабилизация частоты фотостимуляции осуществляли с использованием многоканального высокоскоростного устройства вывода цифровых сигналов «QMBox90-16» производства ООО «НПП Р-Технолоджи». Регистрацию электроэнцефалограммы осуществляли с применением электроэнцефалографа «Нейрон-Спектр-4/ВП» производства ООО «Нейрософт». Данные регистрировали с отведений OZ, O1, O2, PZ, P3, P4, T5, T6. Анализировали данные 40 накоплений результатов фотостимуляции при частоте дискретизации 1 кГц. Эпоха анализа устойчивых ЗВП составляла 2 с. Важно отметить, что при частоте фотостимуляции, например, в 9,61 Гц 40 накоплений для первого отсчета ВП дадут суммарную длительность регистрации не менее 6,4 с. При этом 40 накоплений будут получены только для периода устойчивых ЗВП, соответствующего первой вспышке фотостимулятора от начала накопления данных. Для накопления необходимого числа данных для всех периодов устойчивых ЗВП, попадающих в эпоху анализа, требуется дополнительное время, индивидуально рассчитываемое для каждой частоты фотостимуляции. Таким образом, накапливались значения ВП так, что каждый отсчет в эпоху анализа представлял собой среднее значение из 40 отсчетов электроэнцефалограмм с опорной точкой накопления ВП, соответствующей началу вспышки фотостимулятора. При этом данные ВП, находящиеся за пределами эпохи анализа, в дальнейших расчетах не использовались. Аналогичная процедура проводилась и для других частот стимуляции.

В результате проведенного эксперимента было установлено, что для всех испытуемых медианные и модальные значения числа элементов устойчивых ЗВП, формирующих локальные максимумы спектральной картины ВП в диапазоне от 8 до 48 Гц, оказались одинаковыми и равными 3 (см. рис. 4). Тем не менее для каждого испытуемого были получены индивидуальные статистически значимые различия (по критерию Крускалы–Уоллеса $p \ll 0,01$ с поправкой на эффект множественных сравнений) в структуре элементов ВП, зарегистрированных с разных отведений, включая межполушарную асимметрию.

Для всех пяти испытуемых были выявлены, наряду с основным элементом устойчивых ЗВП, равным частоте фотостимуляции, и другие до-

полнительные элементы. Ряд из них представляет собой хорошо известный феномен образования пиков спектра сигнала на частотах, кратных основной частоте сигнала. Так, для частоты 10,64 Гц пики должны были находиться на частотах 5,32 Гц (т.е. за пределами исследуемого в эксперименте частотного диапазона), 21,28 Гц, 42,56 Гц и т.д.

Однако анализ числа элементов ВП и областей $W_i(\Delta a_i, \Delta b_i)$ показывает наличие в устойчивых ЗВП еще и дополнительных и не постоянно детектируемых ЦЛМ. В отличие от ЦЛМ, непосредственно связанных с частотой фотостимуляции, эти ЦЛМ находятся на частотах, не кратных частоте фотостимуляции, и не присутствуют в исследуемых устойчивых ЗВП в течение всей эпохи анализа ВП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе предложен метод анализа вызванных потенциалов головного мозга, основанный на оценке структуры цепочек локальных максимумов, рассчитанных на основе матрицы квадратов коэффициентов вейвлет-преобразования. При этом восстановление амплитудно-частотных составляющих известных компонентов ВП осуществляется адаптивно, основываясь на частотно-временных особенностях самого ВП. Представлены общие для различных ВП подходы, обеспечивающие выделение и формирование цепочек локальных максимумов и минимумов. Описаны механизмы формирования в пространстве «масштаб вейвлет-преобразования – время» областей, отражающих отдельные элементы ВП. Продемонстрирована реализация метода для исследования зрительных вызванных потенциалов, в ходе которой установлено, что компоненты ВП с точки зрения предложенного метода представляют собой сумму не менее двух–трех элементов, являющихся отдельными частотно-временными областями. Данные области, для которых можно указать собственное латентное время и амплитудные характеристики, в рамках современной парадигмы оценки ВП могут иметь самостоятельное клинико-физиологическое значение. Продемонстрирована устойчивость работы предложенного алгоритма при использовании двух вейвлетов: Morlet и WAVE. На основе представленного метода разработан алгоритм анализа ВП, который был применен для оценки устойчивых ЗВП при фотостимуляции. Показано наличие кроме основного элемента ВП, соответствующего частоте стимуля-

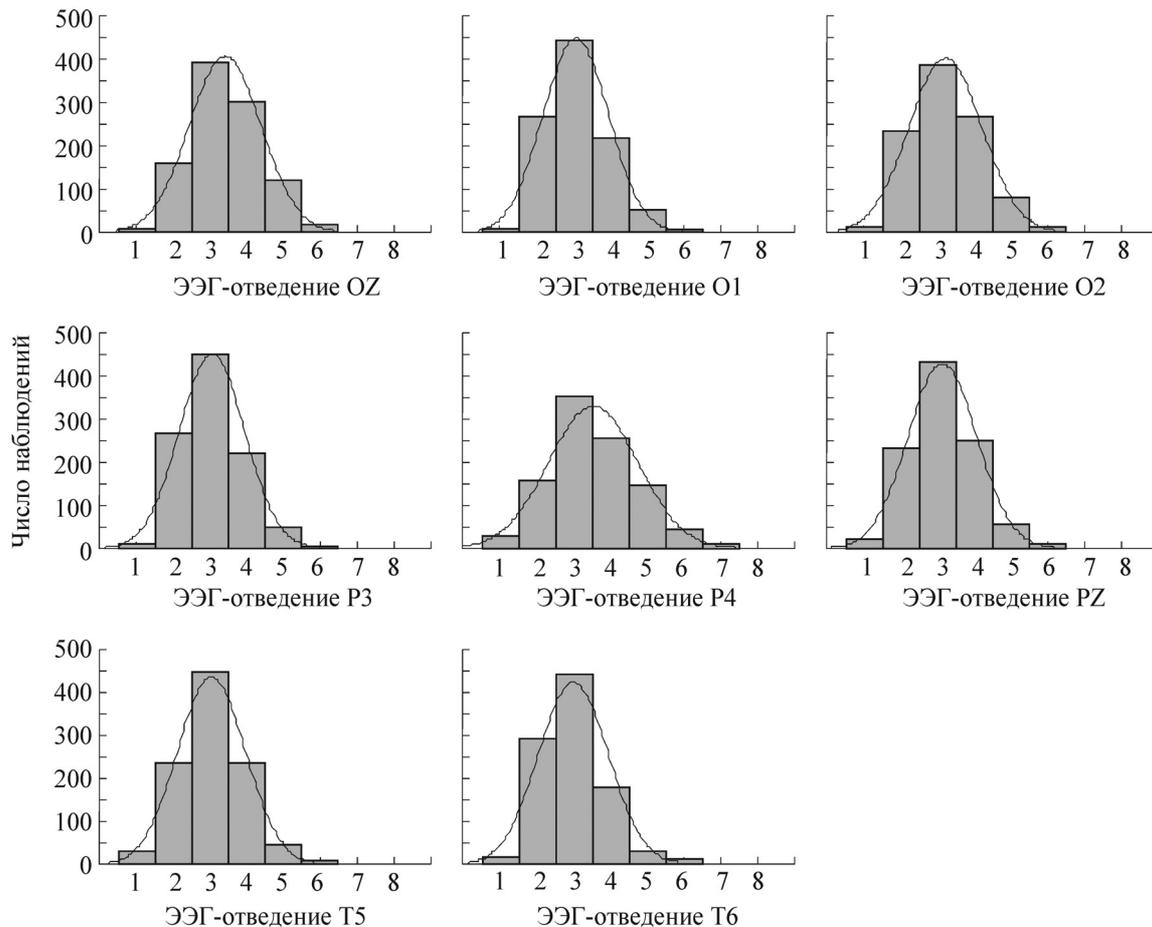


Рис. 4. Распределение числа локальных максимумов матрицы $W^2(a,b)$ в частотном диапазоне 8–48 Гц в зависимости от электроэнцефалографического отведения для испытуемого К. Различия являются статистически значимыми ($p < 0,001$). Непрерывной линией отмечена аппроксимация эмпирического распределения числа локальных максимумов матрицы $W^2(a,b)$ нормальным распределением.

ции, и дополнительных его элементов, которые, в отличие от основного компонента, связанного с частотой фотостимуляции, расположены на некратных ей частотах и не присутствуют в вейвлет-спектре в течение всей эпохи анализа устойчивых ЗВП. Таким образом, разработанный метод открывает новые возможности для анализа ВП различного генеза, что позволяет рассчитывать на получение детализированных как экспериментальных, так и клинических данных для широкого спектра состояний мозга.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В. В. Гнездицкий, *Вызванные потенциалы мозга в клинической практике* (МЕДПресс-информ, М., 2003).
2. М. Б. Костюнина и А. Посада, *Биофизика* **57** (4), 726 (2012).
3. Г. Р. Тазиева и Л. Я. Шагиахметова, *Казанский мед. журн.* **83** (6), 450 (2002).
4. М. В. Пронина, Автореф. дис. ... канд. биол. наук (Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН, СПб., 2013).
5. G. Garcia, *Computer-Human Interaction*, Florence, Italy (2008).
6. D. Zhu, J. Bieger, G. G. Molina, et al., *Computational Intelligence and Neuroscience* **2010**, 1 (2010).
7. E. Donchin, K. M. Spencer, and R. Wijesinghe, *IEEE Trans. Rehab. Eng.* **8** (2), 174 (2000).
8. Z. Vahabi, R. Amirfatahi, and A. Mirzaei, *J. Med. Signals Sens.* **1** (3), 165 (2011).
9. Я. А. Туровский, Л. А. Битюцкая, В. В. Мишин и др., *Биофизика* **48** (4), 727 (2003).
10. Я. А. Туровский, С. Д. Кургалин и А. Г. Семёнов, *Биофизика* **59** (1), 185 (2014).
11. М. В. Войткова и А. П. Войтович, *Биомед. радиоэлектроника* **3**, 12 (2012).
12. Н. М. Астафьева, *Успехи физ. наук* **166** (11), 1145 (1996).
13. Я. А. Туровский, С. Д. Кургалин и А. А. Вахтин, *Биомед. радиоэлектроника* **12**, 39 (2012).

14. Я. А. Туровский, С. Д. Кургалин, А. В. Максимов и др., Вестн. Воронежского гос. ун-та. Серия: Системный анализ и информационные технологии **2**, 69 (2012).
15. Я. А. Туровский, С. Д. Кургалин и А. Г. Семёнов, Системы управления и информационные технологии **52** (2), 24 (2013).
16. Я. А. Туровский, С. Д. Кургалин и А. Г. Семёнов, Цифровая обработка сигналов **1**, 36 (2014).
17. X. Gao, D. Xu, M. Cheng, et al., IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering **11** (2), 137 (2003).

Event-related Brain Potential Investigation Using Adaptive Wavelet Recovery Method

Ya.A. Turovsky, S.D. Kurgalin, A.A. Vahtin, S.V. Borzunov, and V.A. Belobrodsky

Department for Computer Science, Voronezh State University, Universitetskaya pl. 1, Voronezh, 394051 Russia

The method of event-related brain potential (ERP) investigation was suggested. This method aims at obtaining an estimate of a structure of the chains of the local maxima, obtained from wavelet-transform ERP matrix. The common approach for ERP analysis was represented. With this approach it was possible to form and detect the chains of the local maxima and minima of wavelet -transformation ERP matrix,. The algorithms for adaptive recovery of ERP elements after forward wavelet-transform were described based on time scaling signals depicting separate elements of event-related components. When using the method for estimation of visual ERP it was found out that ERP components were formed with no less than 2-3 elements. These elements were the time and frequency domains. These domains being the basis for the adaptive recovery of ERP elements, having their certain latent time and amplitude features, can be independently of clinical and physiological importance. This method showed its stability toward the change in wavelet function (Morlet, WAVE) used during analysis. This method was used for SSVEP analysis. The new elements in SSVEP were detected. These elements were not constantly present in SSVEP spectrum.

Key words: electroencephalogram, wavelet analysis, local spectrum, chain of local maxima, event-related potential