



МЕТОД ВЫДЕЛЕНИЯ ДВУХ ТИПОВ АКТИВНОСТИ НЕЙРОННОГО АНСАМБЛЯ ГОЛОВНОГО МОЗГА В ТЕЧЕНИЕ СНА ПО СИГНАЛАМ ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАММ

В.В. Грубов

Предложен метод выделения двух различных типов сонных веретен на электроэнцефалограммах. Показано, что данный метод имеет высокую точность и может быть использован в нейрофизиологических исследованиях по изучению закономерностей появления тех или иных паттернов на электроэнцефалограммах.

Ключевые слова: Непрерывное вейвлетное преобразование, электроэнцефалограмма, эпилепсия, сонные веретена, формы ритмической активности, диагностика.

В настоящее время в радиофизике разработано большое число методов анализа сложных колебательных процессов, которые все чаще находят применение в других областях естествознания, в том числе в физиологии и медицине [1,2]. Эти методы оказываются особенно эффективными в исследованиях динамики активности нейронных сетей. Последние имеют крайне сложную структуру, поскольку состоят из большого числа отдельных колебательных элементов с собственной сложной динамикой – нейронов.

Для получения информации о работе головного мозга используют методы регистрации электрической активности мозга путем записи электроэнцефалограмм (ЭЭГ), которые представляют собой усредненную сумму электрических токов, генерируемых группой нейронов в области регистрирующего электрода [3]. Традиционно на ЭЭГ выделяют несколько частотных диапазонов (альфа, бета, гамма, дельта и т.д.). Доказано, что существует четкая корреляция между возбуждением той или иной частотной составляющей на ЭЭГ и функциональным состоянием организма, поэтому одной из важнейших задач электроэнцефалографических исследований является выделение определенных форм ритмической активности.

Одним из наиболее многочисленных осцилляторных паттернов на ЭЭГ, наблюдающихся во время сна, являются сонные веретена, которые представляют собой колебания характерной «веретенообразной» формы с частотой 10...15 Гц и средней

продолжительностью 0.5...1.5 с. Сонные веретена формируются вследствие синхронной работы нервной сети, объединяющей нейроны коры и таламуса. Также следует отметить большую вариабельность сонных веретен, значительно усложняющую их диагностику. Так, существует по крайней мере два вида веретенной активности: собственно сонные веретена с частотой 10...15 Гц и низкочастотные (НЧ) осцилляции, по форме и продолжительности сходные с веретенами, но имеющие более низкую частоту – в диапазоне 5...9 Гц. Изучение сонных веретен представляет интерес благодаря их возможной связи с эпилептической активностью. В частности, существует гипотеза о трансформации веретен в эпилептические пик-волновые разряды [4].

Целью данной работы является развитие метода автоматической диагностики сонных веретен на ЭЭГ, разработанного в [5], применительно к выделению как классических сонных веретен, так и веретеноподобных НЧ-осцилляций. Использование метода автоматической разметки ЭЭГ является важным в нейрофизиологической практике при исследовании временных рядов большой продолжительности, например для выявления нелинейно-динамических закономерностей появления тех или иных ритмов (см., например, [6–8]).

В работе были использованы записи ЭЭГ, зарегистрированные в коре и таламусе у шести крыс эпилептической линии WAG/Rij. Запись проводилась непрерывно в течение 24 часов, поэтому содержит как фрагменты сна с ярко выраженными сонными веретенами, так и фрагменты бодрствования. Все эксперименты для записи данных проводились в Дондеровском центре сознания Университета Радбауд (Наймеген, Нидерланды).

Ранее, в работе [5] был предложен метод, основанный на использовании непрерывного вейвлетного преобразования. Суть метода заключается в следующем. Рассчитывается мгновенная энергия вейвлетного преобразования, которая затем усредняется по некоторым характерным частотным диапазонам. Если энергия в одном из диапазонов превышает определенное пороговое значение, то делается вывод о наличии сонного веретена в данный момент времени.

Метод, предлагаемый в данной работе, также использует непрерывное вейвлетное преобразование, которое представляет собой свертку исследуемого сигнала $x(t)$ и некоторой базисной функции

$$W(s, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \varphi_{s,\tau}^* dt.$$

Базисная функция $\varphi_{s,\tau}(t)$ может быть получена из материнского вейвлета с помощью следующего преобразования

$$\varphi_{s,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \varphi_0 \left(\frac{t - \tau}{s} \right).$$

В методе используется материнский морле-вейвлет, который, как было показано в работе [5], является наиболее подходящим для данной задачи

$$\varphi(\eta) = \frac{1}{\sqrt[4]{\pi}} e^{j\omega_0 \eta} e^{-\frac{\eta^2}{2}}.$$

Расчет мгновенной энергии вейвлетного преобразования $w(t)$ в характерном частотном диапазоне F_s осуществляется с помощью следующего выражения:

$$w(t) = \int_{F_s} |W(s, t)| ds.$$

В данной работе, исходя из особенностей частотного состава веретеноподобных паттернов, используются два частотных диапазона $F_{s1} \in [5...9]$ Гц и

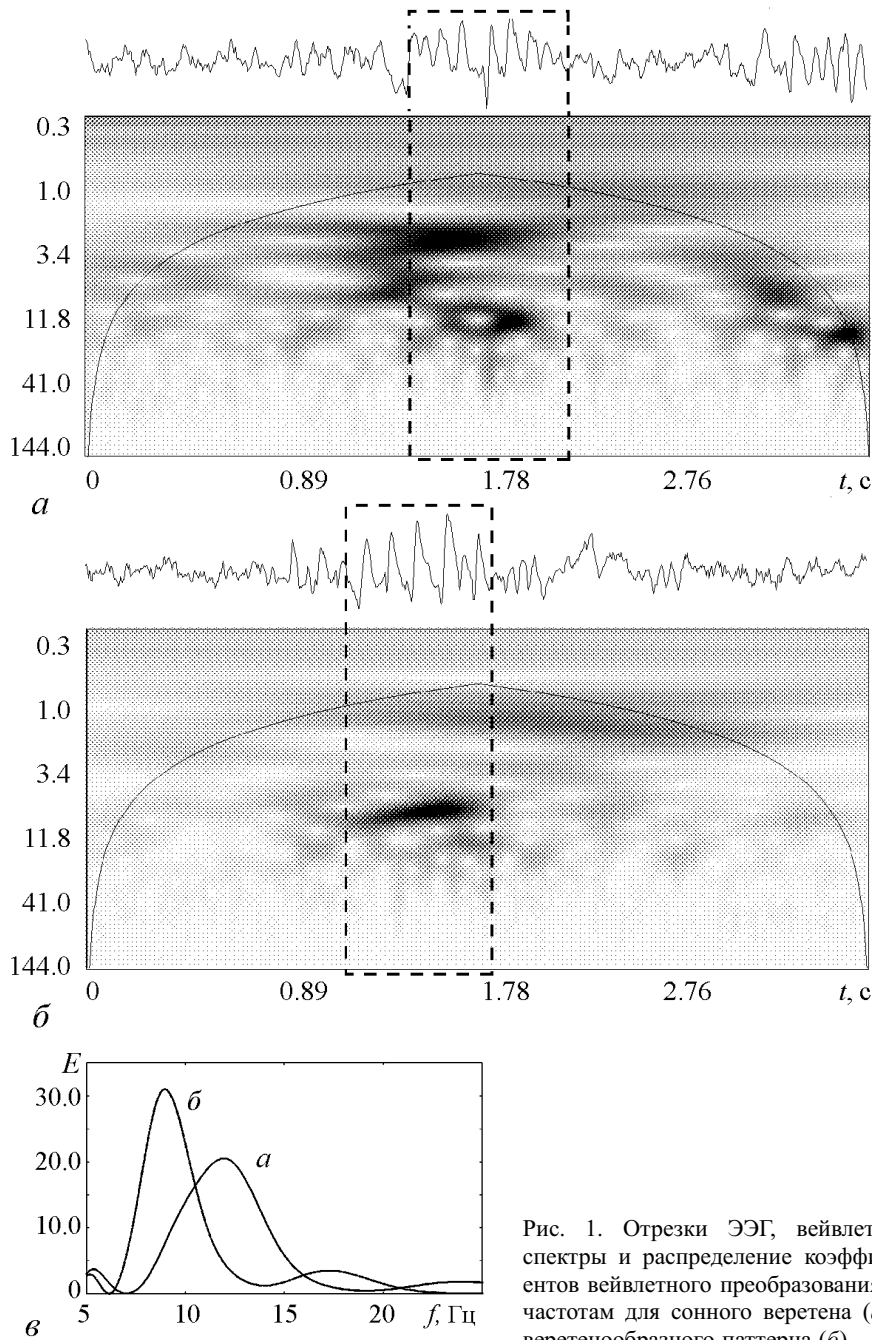


Рис. 1. Отрезки ЭЭГ, вейвлетные спектры и распределение коэффициентов вейвлетного преобразования по частотам для сонного веретена (a) и веретенообразного паттерна (b)

$F_{s2} \in [10...15]$ Гц. Такой подход позволяет выделить как собственно сонные веретена, так и веретенообразные НЧ-осцилляции.

Затем делается вывод о наличии на ЭЭГ того или иного веретенного паттерна на основе анализа энергий $w_1(t)$ и $w_2(t)$ в соответствующих частотных диапазонах F_{s1} и F_{s2} и некоторых пороговых значений w_1 и w_2 . Для этого используется ряд критериев.

Так, классическое сонное веретено выделяется при выполнении следующего соотношения в данный момент времени $w_1(t) < w_1$, $w_2(t) > w_2$ или $w_1(t) > w_1$, $w_2(t) > w_2$, $w_1(t) < w_2(t)$.

Выделение веретенообразной НЧ-осцилляции происходит при выполнении соотношения $w_1(t) > w_1$, $w_2(t) < w_2$ или $w_1(t) > w_1$, $w_2(t) > w_2$, $w_1(t) > w_2(t)$.

В случае, когда выполняется $w_1(t) < w_1$, $w_2(t) < w_2$, делается вывод о том, что в текущий момент времени веретенная активность отсутствует.

Следует отметить, что ЭЭГ является сложным сигналом, в котором могут появляться отдельные резкие всплески активности в различных частотных диапазонах, в том числе в диапазонах, рассматриваемых в рамках разработанного метода. Подобные события могут вызвать кратковременный рост мгновенной энергии преобразования $w(t)$, что приводит к ошибкам при диагностике (ложное детектирование), поэтому в разработанный метод было внесено изменение. Так, при диагностике используются не мгновенные значения энергий w_1 и w_2 , а значения, усредненные по некоторому интервалу времени $\langle w(t) \rangle = 1/T \int_T w(t) dt$.

Численный анализ показал, что оптимальной шириной окна, позволяющей снизить влияние коротких артефактов на качество распознавания, является $T = 1.2$ с.

Также следует учесть сложную динамику частоты в течение сонного веретена [5], которая усложняет диагностику и приводит к ошибкам (например, дробление одного паттерна на несколько). Поэтому в метод было внесено еще одно изменение. Если в какой-либо момент времени выполняется условие $w(t) > w$ в одном из диапазонов, то для последующих моментов времени значение w в этом диапазоне понижается на 30%: $w' = 0.3w$. Первоначальное значение w возвращается в момент времени, для которого перестает выполняться условие $w(t) > w'$. Такое понижение порога позволяет ослабить влияние изменения частоты в течение веретена на качество детектирования.

Разработанный метод был применен к 24-часовым записям ЭЭГ шести крыс

Таблица 1

Номер животного	Веретенообразные паттерны			Сонные веретена			w_0
	f , Гц	$w_{1\max}$	w_1	f , Гц	$w_{2\max}$	w_2	
1	7.2	0.21	0.072	14.1	0.20	0.076	0.031
2	6.4	0.41	0.115	12.6	0.28	0.071	0.028
3	6.1	0.43	0.132	13.2	0.37	0.124	0.034
4	8.3	0.27	0.090	12.8	0.24	0.080	0.025
5	7.4	0.24	0.088	14.0	0.19	0.078	0.028
6	7.8	0.26	0.081	12.1	0.22	0.069	0.024

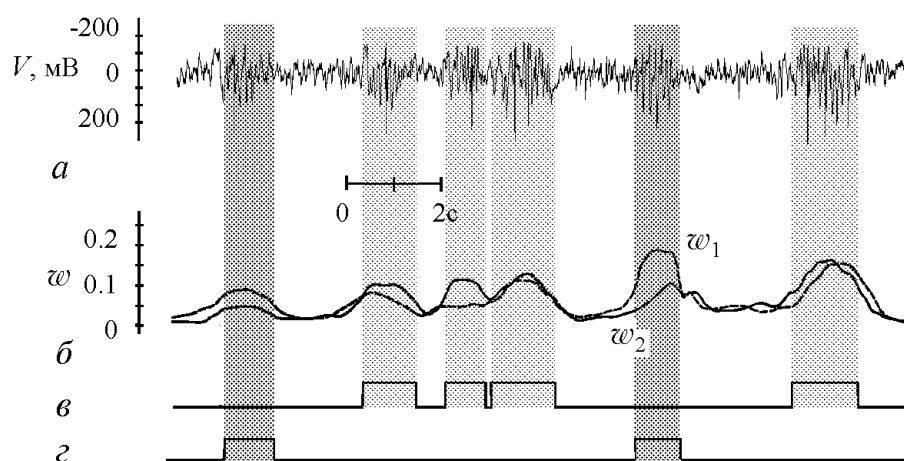


Рис. 2. Отрезок ЭЭГ (а), усредненные по двум диапазонам энергии вейвлетного преобразования $w_1(t)$ и $w_2(t)$ (б); полученная с помощью метода разметка для двух типов веретенообразных паттернов: классических сонных веретен (θ) и НЧ-осцилляций (ζ)

линии WAG/Rij, имеющих предрасположенность к абсанс-эпилепсии. Ниже приведена таблица с параметрами метода, подобранными для каждого исследуемого животного. В ней представлены: средняя частота f , максимальная энергия w_{\max} и пороговое значение энергии w для сонных веретен и веретенообразных осцилляций, а также энергия фоновой ЭЭГ w_0 . Как видно, средняя частота для каждого вида паттерна укладывается в определенные для них диапазоны, что еще раз подтверждает необходимость разделения веретеноподобных паттернов по типам. Пороговое значение w составляет порядка 25–30% от максимальной для данного паттерна энергии w для каждого животного. Такой выбор позволяет выделять максимальное число сонных веретен и свести к минимуму количество ложных детектирований.

На рис. 2 представлен пример работы метода. Как видно из рисунка, разработанный метод не только хорошо выделяет веретенообразные паттерны, но и разделяет их по типам.

Таким образом, в работе предложено дальнейшее развитие метода выделения различных осцилляторных паттернов на ЭЭГ, предложенного ранее в работах [5, 6]. Особенностью метода является возможность эффективного разделения двух типов веретен на сонных ЭЭГ. Данный метод показал высокую точность и был использован в нейрофизиологических исследованиях по изучению закономерностей появления осцилляторных паттернов на ЭЭГ [8]. Разработанный в статье метод может найти применение в нейрофизиологических и медицинских исследованиях, связанных с пониманием природы эпилептогенеза у животных и человека.

Автор выражает благодарность Е.Ю. Ситниковой, А.А. Короновскому, А.А. Овчинникову и А.Е. Храмову за плодотворные обсуждения полученных результатов.

Работа поддержана грантом РФФИ (12-02-00221) и ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы».

Библиографический список

1. Абарбанель Г.Д.И., Рабинович М.И., Селверстон А. и др. Синхронизация в нейронных ансамблях // Успехи физических наук. 1996. Т. 166. С. 363.

2. *Mosekilde E., Mainstrenko Yu., Postnov D.E.* Chaotic synchronization, applications to living systems. Singapore: World Scientific, 2002.
3. *Niedermeyer E., Silva F.L.* Electroencephalography: Basic principles, clinical applications, and related fields. Lippincot Williams & Wilkins, 2004.
4. *Kostopoulos G.K.* Spike-and-wave discharges of absence seizures as a transformation of sleep spindles: the continuing development of a hypothesis // *Clinical Neurophysiology*. 2000. Vol. 111. Suppl 2. S27-38.
5. *Грубов В.В., Овчинников А.А., Ситникова Е.Ю., Короновский А.А., Храмов А.Е.* Вейвлетный анализ сонных веретен на ЭЭГ и разработка метода их автоматической диагностики // *Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика*. 2011. Т. 19. № 4.
6. *Hramov A.E., Koronovskii A.A., Midzyanovskaya I.S., Sitnikova E.Yu., van Rijn C.M.* On-off intermittency in time series of spontaneous paroxysmal activity in rats with genetic absence epilepsy // *CHAOS*. 2006. Vol. 16. 043111
7. *Velazquez P.J.L., Khosravani H., Lozano A. et al.* Type III intermittency in human partial epilepsy. *European Journal of Neuroscience*. 1999. Vol. 11. issue 7, P.2571
8. *Sitnikova E.Yu., Hramov A.E., Grubov V.V., Ovchinnikov A.A., Koronovsky A.A.* On-off intermittency of thalamo-cortical oscillations in the electroencephalogram of rats with genetic predisposition to absence epilepsy // *Brain Research*. 2012. Vol. 1436. P. 147.

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

Поступила в редакцию 10.01.2012

METHOD FOR DETECTING OF TWO TYPES OF BRAIN NEURAL ENSEMBLE ACTIVITY DURING SLEEP ACCORDING TO ELECTROENCEPHALOGRAPHIC RECORDS

V.V. Grubov

Method for detecting of two different types of sleep spindles on electroencephalogram was offered. High precision of this method was demonstrated; it can be used in neurophysiological research of regularity of appearing of different patterns on electroencephalogram.

Keywords: Continuous wavelet transformation, electroencephalogram, epilepsy, oscillatory pattern, sleep spindle, types of spindle activity, diagnostics.



Грубов Вадим Валерьевич – родился в пос. Емильчино Житомирской области (Украина). Студент факультета нелинейных процессов Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского. Работает лаборантом в лаборатории № 5 ОФНС НИИ ЕН СГУ.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83

Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского

E-mail: vvgrubov@gmail.com