

ПРИКЛАДНЫЕ ИННОВАЦИИ

УДК 537.86/87:530.182

В.В. Грубов, А.А. Короновский, Е.Ю. Ситникова, А.В. Иванов, А.Е. Храмов
V. V. Grubov, A. A.Koronovskiy, E. Yu. Sitnikova, A.V. Ivanov, A. E. Khratov

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ АНАЛИЗА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ГОЛОВНОГО МОЗГА: МОНИТОРИНГ ДОЛГОВРЕМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В НЕЙРОФИЗИОЛОГИИ И ЭКОЛОГИИ, КЛИНИЧЕСКАЯ ПРАКТИКА, СОЗДАНИЕ ИНТЕРФЕЙСОВ «МОЗГ-КОМПЬЮТЕР»

HARDWARE AND SOFTWARE SYSTEMS FOR THE ANALYSIS OF THE BRAIN ELECTRICAL ACTIVITY: LONG-TERM MONITORING OF PROCESSES IN NEUROSCIENCE AND ECOLOGY, CLINICAL PRACTICE, DEVELOPMENT OF BRAIN-COMPUTER INTERFACES

Обсуждаются возможности создания аппаратно-программных комплексов для анализа электрической активности головного мозга для осуществления мониторинга долговременных процессов в самых различных областях науки – нейрофизиологии и экологии, клинической практике и для создания интерфейсов «мозг-компьютер». Кратко описывается новый метод, основанный на непрерывном вейвлетном анализе, для решения данной задачи и результаты экспериментальных исследований эпилептической активности на его основе.

The present paper is devoted to the discussion of

Интерфейсы «мозг-компьютер», вейвлеты, электрическая активность мозга, нейронаука, экология, временные ряды

possibility of developing hardware and software systems for the analysis of the brain electrical activity for long-term monitoring of processes in neuroscience and ecology, clinical practice, and in development of brain-computer interfaces. We describe briefly the new wavelet-based method for solution of this problem and the results of experimental studies of epileptic activity based on our approach.

Brain-computer interfaces (BCI), wavelets, electric activity of brain, neuroscience, ecology, time series

Современные математические методы анализа и диагностики сложных колебательных процессов по временным рядам, активно развивающиеся в нелинейной науке в течение последних лет, находят все большее применение в самых разных областях естествознания. В настоящее время значительный интерес вызывает применение методов нелинейной динамики к задачам,

возникающим при изучении и анализе сложного поведения живых систем, в том числе при анализе временных и пространственно-временных сигналов физиологической природы. На настоящем этапе современные методы анализа оказывались особенно востребованными в связи с возросшим интересом к исследованию динамики нейронных сетей головного мозга, которые

представляют собой крайне сложные объекты, состоящие из большого числа элементов со сложной колебательной динамикой – нейронов [1-5]. Традиционным, надежным и весьма эффективным способом получения информации о работе головного мозга служит метод электроэнцефалографии. Электроэнцефалограммы (ЭЭГ) представляют собой усредненную сумму электрических токов, генерируемых большой группой нейронов в окрестности регистрирующего электрода. У человека такой электрод помещается на поверхности кожи головы, и при прохождении через толщу плотных тканей (кожа, мышцы, кость, соединительные покровы) форма нейронного электрического потенциала искажается. У животных существует возможность более точного измерения нейронной активности путем вживления электродов непосредственно в определенную область головного мозга или на поверхность коры больших полушарий (метод регистрации электрокортикограмм). Этот метод позволяет осуществить долговременный мониторинг электрической активности головного мозга и получать данные ЭЭГ непрерывно в течение всего времени жизни животного.

До недавнего времени разработка методов анализа ЭЭГ и диагностики состояния головного мозга проводилась исключительно с использованием заранее записанных сигналов в режиме off-line [3]. Однако в связи с расширением возникающих научных и практических задач особую важность в настоящее время приобретает разработка методов диагностики осцилляторных паттернов на ЭЭГ в режиме реального времени. Решение данной задачи представляет интерес для интерактивного наблюдения за долговременными процессами в нейрофизиологии и экологии, поскольку оно ориентировано на создание системы мониторинга активности головного мозга и позволяет выделять и анализировать в реальном времени динамику мозговой активности в норме (например, когнитивные процессы) и при патологии (эпилепсия, болезнь Паркинсона и т.д.). Новым направлением здесь представляется

использование технологий мониторинга активности головного мозга для исследований в экологии. В частности, данные подходы могут дать объективные показатели для оценки экологической комфортности проживания и осуществления интеллектуальной деятельности человека в условиях мегаполиса, когда человек подвергается различным негативным экологическим факторам (повышенный уровень шума, воздействие вибраций, загрязненность окружающей среды). Применение мониторинга активности головного мозга при изучении таких ситуаций позволит выработать объективные критерии для анализа максимально допустимых уровней внешних воздействий, когда головной мозг функционирует в норме.

Особо следует подчеркнуть также прикладное значение разрабатываемых методов, которые в перспективе могут лieь в основу «интерфейсов мозг–компьютер», что в настоящее время представляется весьма важной и нетривиальной задачей [6, 7]. В настоящее время представляется, что создание компьютерного интерфейса с возможностью мысленного управления человека-оператора может стать альтернативой традиционным устройствам ввода информации в компьютер в условиях, когда их использование невозможно или затруднено. Для определенных категорий пользователей, например лиц с глубокими нарушениями моторики, этот способ общения с компьютером может стать единственно доступным, вернув им возможность полноценной жизни в обществе. Например, в госпитале Chartie создана система Brain Computer Interpretate, которая позволяет, передвигая мысленно курсор, выбирать необходимые буквы на экране, однако для набора фразы требуется от 5 до 10 минут. В университете Элмори был проведен эксперимент, в котором электроды были имплантированы в двигательный центр головного мозга парализованных пациентов, которые научились передвигать курсор на экране и таким образом общаться с врачами (например, выбирая одну из нескольких простых фраз).

Мысленное управление, по сути, является

новым каналом связи между мозгом человека и компьютером [6]. При составлении мысленного сценария действия или последовательности воображаемых команд наблюдается характерная динамика электрической активности мозга, которая отражается на ЭЭГ в виде определенных сдвигов частотно-временных характеристик и изменении пространственной структуры ЭЭГ [8,9]. Для реализации мысленного управления система должна выполнить следующие действия: диагностировать появление характерных изменений на ЭЭГ (распознать паттерн на ЭЭГ), расшифровать их значение (связать с определенным действием) и преобразовать в команды для управления оборудованием. Система мысленного управления требует решения двух задач: во-первых (техническая задача), точно и своевременно распознать паттерн на ЭЭГ, сформулировать и передать «команду» для

управления, во-вторых (когнитивная и психологическая задача), оператору необходимо научиться формировать психические состояния, которые порождают узнаваемые изменения пространственно-временной структуры его/её ЭЭГ. Дополнительная сложность заключается в том, что система должна работать в режиме реального времени. Современные системы, связанные с обработкой и интерпретацией данных активности головного мозга в реальном времени, представляют собой сложные аппаратно-программные комплексы, которые включают в себя как аппаратуру для записи ЭЭГ/ЭКоГ, так и программное обеспечение (что более важно), обеспечивающее динамическую обработку поступающих данных и быструю реакцию системы на формирующиеся в головном мозге паттерны активности.

Схема современного интерфейса мозг-компьютер показана на рис. 1.

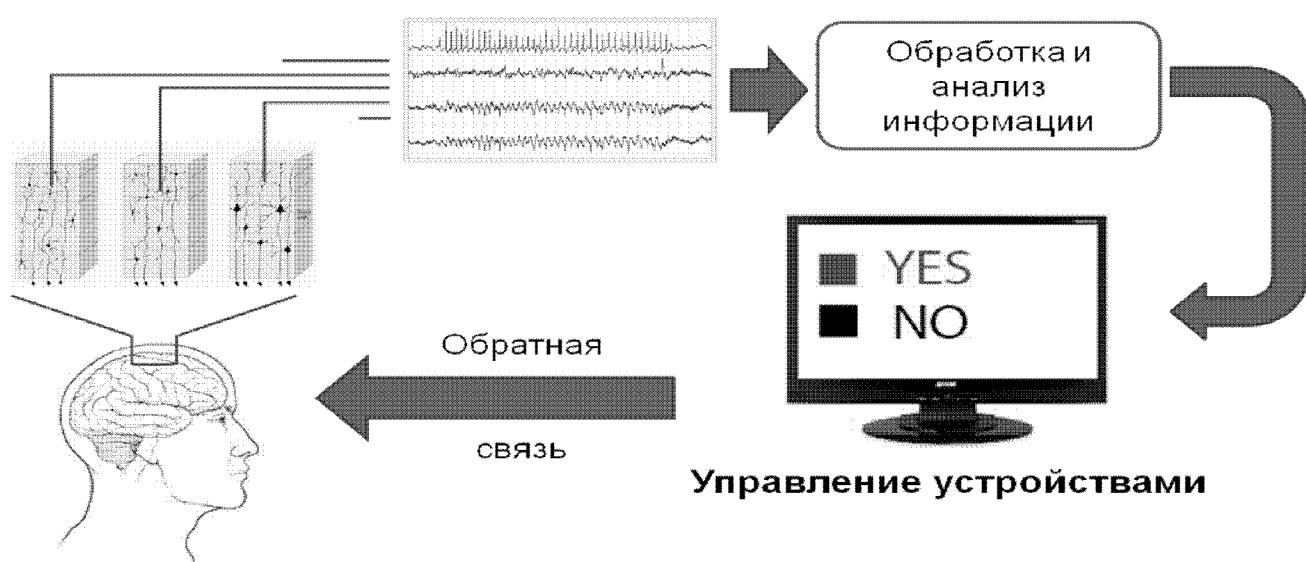


Рис. 1. Схема современного интерфейса «мозг-компьютер» – аппаратно-программного комплекса, который регистрирует и анализирует электрические сигналы мозга пользователя и «конвертирует» их в определенные «машинные» команды

Она включает систему регистрации электрической активности головного мозга, модуль предварительной обработки, осуществляющий удаление артефактов, формирующихся при регистрации сигнала (например, мышечной активности или глазодвигательных артефактов), модуль фильтрации

в необходимом диапазоне частот, программное обеспечение для обработки данных в реальном времени, и наконец, систему обратной связи, которая позволяет корректировать получаемые данные. В настоящее время предложен ряд методов выделения специфических паттернов активности головного мозга. В наших

исследованиях для обработки сигналов ЭЭГ в реальном времени мы использовали аппарат непрерывного вейвлетного анализа, который хорошо зарекомендовал себя в области нейродинамики и нейрофизиологии [3, 10, 11]. Математический аппарат вейвлетного анализа хорошо приспособлен для исследования нестационарных сигналов, чей спектральный состав и статистические характеристики меняются с течением времени, и обладает следующими важными особенностями: представление частотно-временной структуры сигнала; возможность эффективного анализа коротких временных рядов, содержащих небольшое число характерных периодов колебаний; высокая эффективность анализа «зашумленных» данных [12].

Следует отметить, что диагностика осцилляторных паттернов на ЭЭГ/ЭКоГ в режиме реального времени связана с определенными сложностями, поскольку, во-первых, типологически разнородные паттерны (то есть, структуры, принадлежащие к разным классам) могут в некоторых случаях иметь близкий спектральный состав. Поэтому метод, применяемый для распознавания структур, с одной стороны, должен хорошо различать близкие по частотному составу и по энергии паттерны; с другой стороны, должен обеспечить достаточно эффективную численную реализацию для возможности построения реально действующей системы. Во-вторых, сложностью выделения колебательных паттернов на ЭЭГ в режиме реального времени является отсутствие в текущий момент времени полной временной реализации, и исследователю приходится использовать имеющиеся данные от начала наблюдения до настоящего момента времени. Задача построения универсального метода диагностики осцилляторных паттернов в режиме реального времени, хотя и представляет большой интерес, является чрезвычайно сложной, поэтому здесь ограничимся кратким описанием основных принципов разработанного аппаратно-программного комплекса метода диагностики осцилляторных паттернов в реальном времени. Данный метод основан на использовании

более ранних разработок систем автоматического распознавания разных типов осцилляторной активности (пик-волновые разряды, различные типы сонных веретен, 5-9 Гц комплексы, дельта-активность и т.д.) на предварительно записанных сигналах ЭЭГ [13-15]. В основе метода лежит разложение сигнала по комплексному вейвлетному базису (либо стандартному, либо специально сконструированному) и последующий анализ энергии вейвлетного преобразования в определенном характерном для того или иного типа активности диапазоне частот, что позволяет выявить и достаточно точно локализовать те или иные события на ЭЭГ.

Первая проблема эффективного распознавания типологически разнородные паттернов, упомянутая выше, может быть решена благодаря использованию вейвлетного преобразования с комплексным вейвлетом Морле [12]:

$$\phi_0 = \frac{1}{\sqrt[4]{\pi}} e^{j\Omega t} e^{-\eta^2/2}$$

(W – центральная частота, обычно выбирается, W = 2p, что обеспечивает оптимальное частотно-временное разрешение сигнала ЭЭГ/ЭКоГ), который обладает достаточной селективностью по отношению к схожим паттернам. Вторая проблема, связанная с ограниченным временными рядом, может быть разрешена, если принять во внимание тот факт, что вейвлетная функция (1) ограничена во времени, то есть большая часть мощности сосредоточена в некотором интервале $[t_s; t_e]$ и, таким образом, практически без потери точности непрерывное вейвлетное преобразование в дискретизированном представлении может быть записано как

$$W(f, t) = h \sqrt{f} \sum_{t_0 - t_s/h}^{t_0 + (t_e - t_s)/h} x(t) \phi_0((t - t_0)f),$$

где $x(t)$ – сигнал ЭЭГ/ЭКоГ, $h=1/d$, d – частота дискретизации сигнала (обычно от 250 до 1024 Гц при изучении электрической активности головного мозга). Из соотношения (2) следует, что для вычисления энергии преобразования,

приходящейся на определенный масштаб в определенный момент времени, необходимо иметь фрагмент временной реализации длительностью порядка $\phi = t_e - t_s$. Важно отметить, что определить имел ли место осцилляторный паттерн в момент времени t можно только в момент времени $t + \phi/2$, таким образом, величина $\phi/2$ представляет собой принципиально неустранимую задержку автоматической диагностики. Величина ϕ определяется типом материнского вейвлета и частотой, для которой выполняется вейвлетное преобразование. Для материнского Морлевейвлета (1) при $W=2p$ несложно показать, что $\phi = 4/f$ (где f – рассматриваемая частота) [17,18]. Далее после вейвлетного преобразования сигнала (2) в предложенном методе проводился расчет энергии, приходящейся на определенный диапазон частот $D=(f_0, f_1)$ в каждый момент времени:

$$w(t) = \frac{(f_1 - f_0)}{N} \sum_{i=1}^N |W(f_0 + (f_1 - f_0)i/N, t)|^2,$$

где N – число анализируемых частот из диапазона D (обычно необходимая точность достигается при $N=15-20$). Эта величина используется в качестве маркера наличия или отсутствия на ЭЭГ анализируемого паттерна в данный момент на основании сравнения с пороговым критерием s . Осцилляторный паттерн активности головного мозга регистрируется в случае, когда выполняется следующее условие:

$$w(t) > \sigma,$$

где s – порог, обычно определяемый эмпирически как величина, равная двухтрехкратному превышению энергии вейвлетного преобразования фоновой ЭЭГ (то есть зарегистрированной в спокойном состоянии, когда искомые осцилляторные паттерны заведомо отсутствуют) в исследуемом частотном диапазоне D . Следует отметить, что критерии могут быть и более сложными, но здесь мы на этих специальных вопросах не останавливаемся [15,18].

В случае недостаточно качественной записи ЭЭГ (например, при наличии большого числа

помех, которые могут возникать как короткие интенсивные всплески, характеризующиеся широким спектром частот в Фурье-пространстве) данный алгоритм дает сбои и приводит к росту неправильно определенных паттернов за счет того, что подобные артефакты могут вызывать резкое увеличение мгновенной энергии преобразования и вызывать ложное детектирование анализируемого паттерна. В этом случае процедура (2)-(4) подвергалась модификации для повышения точности анализа. В этом случае с пороговым значением s в (4) сравнивалось не мгновенное значение энергии преобразования (3), а значение, усредненное по некоторому временному интервалу T . Следует отметить, что чем больше ширина окна T , по которому проводилось усреднение, тем большая точность метода диагностики; однако тем больше времени требуется для детектирования искомого паттерна.

Разработка методов эффективного выделения осцилляторных паттернов активности головного мозга в реальном времени и создание на их основе интерфейса «мозг-компьютер» проводились совместно с исследователями из университета Радбауд (г. Наймеген, Нидерланды) [21]. На основе предложенного метода совместно с коллегами из университета Радбауд (г. Наймеген, Нидерланды) создан аппаратно-программный комплекс диагностики эпилептической активности в режиме реального времени, который используется совместно с системой сбора данных WinDAQ, где реализована возможность двунаправленного обмена данными с АЦП/ЦАП. В настоящее время осуществляются работы по адаптации вышеописанных принципов диагностики нейронной активности головного мозга для создания аналогичной системы диагностики у человека и её интеграции с российским электроэнцефалографом-регистратором «Энцефалан-ЭЭГР-19/26» (Таганрог). Аппаратная часть («Энцефалан») представляет собой многоканальное (43 канала) многофункциональное устройство для исследования электрической активности головного мозга человека в различных

условиях. Мы полагаем, что созданная система позволит решать широкий круг исследуемых задач, начиная от мониторинга и исследования патологической активности, до анализа и диагностики в реальном времени когнитивной деятельности человека, включая задачи экологической направленности.

Рассмотрим результаты тестирования и работы аппаратно-программного комплекса на примере диагностики и мониторинга эпилептических событий на ЭКоГ. Удобным объектом исследования в данном случае являются специально выведенная линия крыс WAG/Rij с генетической предрасположенностью к абсансы-эпилепсии, которая характеризуется схожими с человеком паттернами эпилептической активности, вследствие чего данная линия крыс часто рассматривается как удобная животная модель абсансы-эпилепсии [19,20]. Характерный отрезок ЭКоГ с несколькими пик-волновыми разрядами показан на рис. 2. Система была настроена на выделение пик-волновых разрядов в течение 500 мс с начала

эпилептического события. Этот интервал выбран в связи с тем, что события на ЭКоГ, имеющие характерную форму пик-волновых разрядов, но длящиеся меньше 1 секунды, не рассматриваются как эпилептические события. При обнаружении пик-волновых разрядов (паттернов абсансы-эпилепсии) аппаратно-программный комплекс подавал на один из выходов ЦАП прямоугольный импульс, который мог быть использован как для регистрации эпилептического приступа, так и для управления некоторым внешним устройством (например, электронным генератором), воздействующим на мозг подопытного животного. Таким образом, создавалась обратная связь, которая давала возможность ставить целый ряд экспериментов по изучению воздействия импульсов тока на развитие гиперсинхронной активности (эпилептического припадка) в коре головного мозга. Рис. 2б иллюстрирует полученные результаты по работе системы автоматического выделения пик-волновых разрядов.

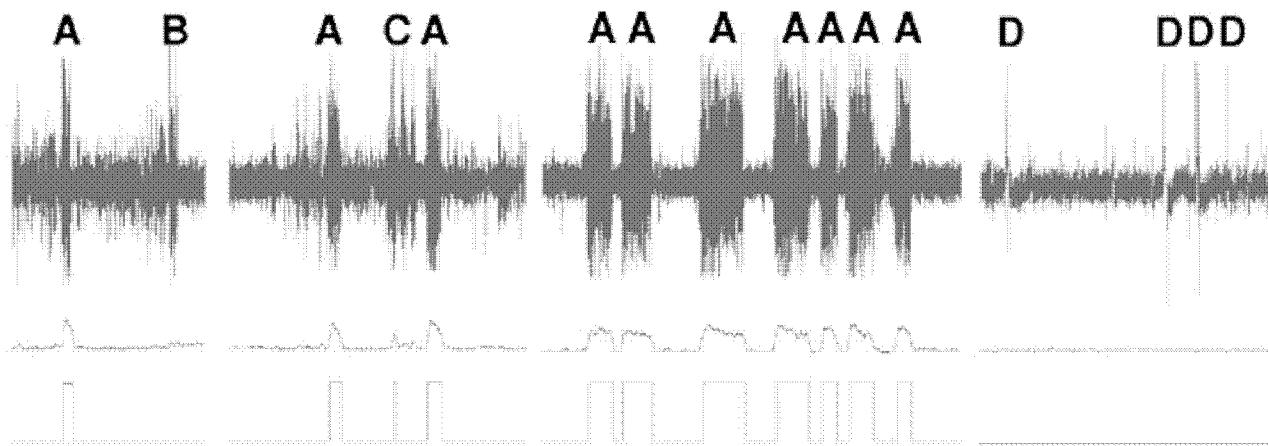


Рис. 2. Иллюстрация работы аппаратно-программного комплекса по анализу в реальном времени эпилептической активности головного мозга у мыши WAG/Rij. Сверху показаны типичные отрезки регистрируемой ЭЭГ. Символом А отмечены пик-волновые разряды, В, С, Д – другие типы электрической активности с соизмеримой амплитудой и формой. В середине – сигнал $w(t)$ (3), рассчитываемый по вейвлетному преобразованию, снизу – сигнал, выдаваемый программным обеспечением о наличии и длительности пик-волновых разрядов, который далее применяется для управления внешних устройств

Символом А отмечены пик-волновые разряды, В, С, Д – другие типы электрической активности с соизмеримой амплитудой и формой. В середине – сигнал $w(t)$ (3), рассчитываемый по вейвлетному преобразованию, снизу – сигнал, выдаваемый программным обеспечением о наличии и длительности пик-волновых разрядов, который далее применяется для управления внешних устройств

Проверка работоспособности разработанной системы детектирования осцилляторных паттернов в реальном времени была проведена в условиях живого эксперимента в университете Радбауд (г. Наймеген, Нидерланды). В ходе первого эксперимента была протестирована эффективность системы, находящейся на аппаратном обеспечении WinDAQ, при распознавании приступов абсанс эпилепсии у восьми крыс WAG/Rij непрерывно в течение 4 часов. Запись ЭКоГ осуществляли с помощью электродов, имплантированных на поверхность лобной и затылочной коры головного мозга животных. После завершения эксперимента ЭКоГ подвергалась экспертной оценке приступов абсанс-эпилепсии, которую проводил опытный нейрофизиолог, затем результаты экспертных оценок сравнивались с результатами автоматического распознавания. Для оценки эффективности системы автоматического распознавания определяли

число верно распознанных, пропущенных и ложно определенных пик-волновых разрядов. Исследования показали, что точность и уровень значимости распознавания на коротких записях ЭКоГ достигли 100%, а среднее по восьми животным значение критерия мощности составило порядка 97% [14]. Все это является свидетельством высокой точности и селективности использованных алгоритмов в рамках относительно коротких интервалов времени.

При суточном мониторинге активности головного мозга ситуация несколько ухудшилась. На рис. 3 показано соотношение между числом верно распознанных эпилептических событий, ошибочно определенных как пик-волновой разряд и пропущенных пик-волновых разрядов в течение 24-часового мониторинга у 4 животных.

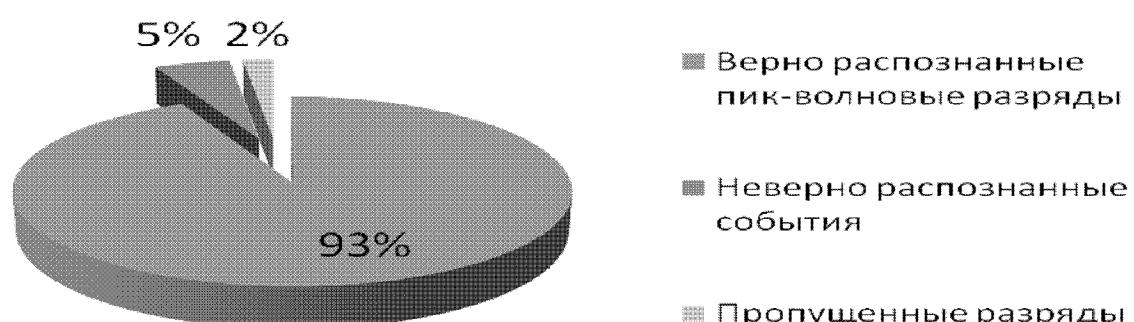


Рис. 3. Эффективность работы аппаратно-программного комплекса по распознаванию эпилептической активности (пик-волновых разрядов) на электрокортикограмме в реальном времени. Распределение числа верно распознанных пик-волновых разрядов, ошибочно определенных и пропущенных эпилептических событий в течение 24-часового эксперимента в группе крыс WAG/Rij

Нетрудно видеть, что число неверно распознанных и нераспознанных событий в реальном времени оставалось малым на протяжении всего эксперимента. Уменьшение мощности критерия относительно 5-часового эксперимента может быть связано с особенностями динамики мозга. Известно, что в течение суток происходят некоторые изменения формы ЭКоГ, что сопровождается

изменениями в распределении энергии по диапазонам частот и приводит к появлению на ЭКоГ паттернов, ошибочно распознаваемых как эпилептические события. Тем не менее, точность метода остается весьма высокой на протяжении всего 24-часового периода наблюдений. Однако суточные изменения частотно-временных характеристик ЭКоГ необходимо учитывать при долговременном

мониторинге активности головного мозга, в частности, использовать процедуры, позволяющие подстраивать параметры метода в ходе выполнения экспериментов.

Таким образом, в работе описаны общие принципы построения аппаратно-программных комплексов для регистрации и мониторинга активности головного мозга человека и животных, которые могут применяться для широкого спектра задач, включая нейрофизиологические и экологические исследования, в медицинской практике, а также могут рассматриваться как прообразы интерфейсов «мозг-компьютер». Разработанный авторами метод диагностики паттернов на электроэнцефалограммах послужил основой для создания аппаратно-программного комплекса для осуществления

долговременного мониторинга эпилептической активности в условиях эксперимента. Мы полагаем, что предложенный метод позволяет в перспективе разработать и внедрить новые для современной нейрофизиологии методы анализа, и на основе этого создать эффективные интерфейсы «мозг-компьютер».

Работа поддержана Министерством образования и науки РФ, Соглашения №№ 14.B37.21.0059 и 14.B37.21.0576, грантом РФФИ 12-02-31544, в рамках выполнения Государственного задания Минобрнауки России высшим учебным заведениям на 2013 и плановый период 2014 и 2015 годов в части проведения научно-исследовательских работ (СГТУ-79), а также Программой развития СГТУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Buzsaki G. *Neuronal Oscillations in Cortical Networks* / G. Buzsaki , A. Draguhn // *Science*. 304 (2004) 1926-1929.
2. Buzsaki G. *Large-scale recording of neuronal ensembles* / G. Buzsaki // *Nature Neurosci*. 7 (2004) 446-451.
3. Вейвлет-анализ в нейродинамике / А.Н. Павлов, А.Е. Храмов, А.А. Короновский, Е.Ю. Ситникова, В.А. Макаров, А.А. Овчинников // УФН. 182 (2012) 905-939.
4. Некоркин В. И. Нелинейные колебания и волны в нейродинамике / В. И. Некоркин // Успехи физических наук. 178 (3) (2008) 313.
5. Модели динамики нейронной активности при обработке информации мозгом – итоги «декадилетия» / Г.Н. Борисюк, Р.М. Борисюк, Я.Б. Казанович, Г.Р. Иваницкий // Успехи физических наук. 172 (10) (2002) 1189.
6. Guger C. *How many people are able to operate an EEG-based brain-computer interface (BCI)* / C. Guger // *IEEE Trans. Rehab. Eng.* (2003) 145.
7. Guger C. *Real-time EEG analysis for a brain-computer interface (BCI) with subject-specific spatial patterns* / C. Guger, H. Ramoser, G. Pfurtscheller // *IEEE Trans. Rehab. Eng.* (8) (2000) 562.
8. Свидерская Н.Е. Влияние индивидуально-психологических характеристик на пространственную организацию ЭЭГ при невербально-дивергентном мышлении / Н.Е. Свидерская, А.Г. Антонов // *Физиология*

REFERENCES

1. Buzsaki G. *Neuronal Oscillations in Cortical Networks* / G. Buzsaki , A. Draguhn // *Science*. 304 (2004) 1926-1929.
2. Buzsaki G. *Large-scale recording of neuronal ensembles* / G. Buzsaki // *Nature Neurosci*. 7 (2004) 446-451.
3. Wavelet analysis in neurodynamics / A.N. Pavlov, A.E. Khramov, A.A. Koronovskii , E.Y. Sitnikov, V.A. Makarov, A.A. Ovchinnikov // *UFN*. 182 (2012) 905-939.
4. Nekorkin V.I. *Nonlinear oscillations and waves in neurodynamics* / V.I. Nekorkin // *Advances of Physical Sciences*. 178 (3) (2008) 313.
5. Models of neural dynamics in brain information processing – results of ‘the decade’ / G.N. Borisyuk, R.M. Borisyuk, J.B. Kazanovich, G.R. Ivanitskii. 172 (10) (2002) 1189.
6. Guger C. *How many people are able to operate an EEG-based brain-computer interface (BCI)* / C. Guger // *IEEE Trans. Rehab. Eng.* (2003) 145.
7. Guger C. *Real-time EEG analysis for a brain-computer interface (BCI) with subject-specific spatial patterns* / C. Guger, H. Ramoser, G. Pfurtscheller // *IEEE Trans. Rehab. Eng.* (8) (2000) 562.
8. Sviderskaya N.E. *The influence of individual psychological characteristics on the spatial organization of the EEG during non-verbally-divergent thinking* / N.E. Sviderskaya, T.N.Dashchynski // *Human Physiology*. 34, 5 (2008) 34.

- человека. 34, 5 (2008) 34.
9. Свидерская Н.Е. Пространственная организация ЭЭГ при активизации творческих процессов / Н.Е. Свидерская, Т.Н. Дацунская, Г.В. Таратынова // Журн. высш. перв. деят. 51 (2001) 393.
 10. Sosnovtseva O. V. Interference microscopy under double-wavelet analysis: A new tool to studying cell dynamics. / O. V. Sosnovtseva, A. N. Pavlov, N. A. Brazhe // Phys. Rev. Lett. 94 (2005) 218103.
 11. Bosnyakova D. Time-frequency analysis of spike-wave discharges using a modified wavelet transform / D. Bosnyakova, A. Gabova, G. Kuznetsova // J Neurosci Methods. 1654 (1-2) (2006) 80-88.
 12. Короновский А.А. Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения / А. А. Короновский, А. Е. Храмов. М.: Физматлит, 2003.
 13. Автоматическое выделение и анализ осцилляторных паттернов на нестационарных сигналах ЭЭГ с использованием вейвлетного преобразования и метода эмпирических мод. / В.В. Грубов, Е.Ю. Ситникова, А.А. Короновский, А.Н. Павлов, А.Е. Храмов // Изв. РАН. Сер. физическая. 76, 12 (2012) 1520-1523.
 14. Sleep spindles and spike-wave discharges in EEG: Their generic features, similarities and distinctions disclosed with Fourier transform and continuous wavelet analysis / E.Yu. Sitnikova, A.E. Hramov, A.A. Koronovskii, G. Luijtelaar van // Journal of Neuroscience Methods. 180, (2009) 304-316.
 15. Грубов В. В. Метод выделения двух типов активности нейронного ансамбля головного мозга в течение сна по сигналам электроэнцефалограмм / В.В. Грубов // Изв. Вузов. Прикладная нелинейная динамика. 20, 1 (2012) 133-138.
 16. On-off intermittency in time series of spontaneous paroxysmal activity in rats with genetic absence epilepsy / A.E. Hramov, A.A. Koronovskii, I.S. Midyanovskaya, E.Yu. Sitnikova, C.M. Rijn van // CHAOS. 16, (2006) 043111.
 17. Диагностика и анализ осцилляторной нейросетевой активности головного мозга с использованием непрерывного вейвлетного преобразования / А.А. Короновский, Ж. ван Свидерская, Т.Н. Дацунская, Г.В. Таратынова // Журн. высш. перв. деят. 51 (2001) 393.
 9. Sviderskaya N.E. The spatial organization of EEG during activation of creative processes / N.E. Sviderskaya, T.N. Dashchynski, G.V. Taratynova // Higher nervous activity. 51 (2001) 393.
 10. Sosnovtseva O. V. Interference microscopy under double-wavelet analysis: A new tool to studying cell dynamics. / O. V. Sosnovtseva, A. N. Pavlov, N. A. Brazhe // Phys. Rev. Lett. 94 (2005) 218103.
 11. Bosnyakova D. Time-frequency analysis of spike-wave discharges using a modified wavelet transform / D. Bosnyakova, A. Gabova, G. Kuznetsova // J Neurosci Methods. 1654 (1-2) (2006) 80-88.
 12. Koronovskii A.A., Khramov A.E. Continuous wavelet analysis and its applications / A.A. Koronovskii, A.E. Khramov. M.: Phimathlit, 2003.
 13. Automatic selection and analysis of oscillatory patterns in the non-stationary EEG signals using wavelet transformation and the method of empirical modes / V.V. Grubov, E.J. Sitnikov, A.A. Koronovskii, A.N. Pavlov, A.E. Khramov // RAS. Physical ser. 76, 12 (2012) 1520-1523.
 14. Sleep spindles and spike-wave discharges in EEG: Their generic features, similarities and distinctions disclosed with Fourier transform and continuous wavelet analysis / E.Yu. Sitnikova, A.E. Hramov, A.A. Koronovskii, G. Luijtelaar van // Journal of Neuroscience Methods. 180, (2009) 304-316.
 15. Grubov V.V. The method of distinguishing two types of neuronal ensemble activity of the brain during sleep by electroencephalogram signals / V.V. Grubov // Proc. of Higher Education. Applied Nonlinear Dynamics. 20, 1 (2012) 133-138.
 16. On-off intermittency in time series of spontaneous paroxysmal activity in rats with genetic absence epilepsy / A.E. Hramov, A.A. Koronovskii, I.S. Midyanovskaya, E.Yu. Sitnikova, C.M. Rijn van // CHAOS. 16, (2006) 043111.
 17. Diagnosis and analysis of oscillatory brain neural activity through continuous wavelet transformation / A.A. Koronovskii, J. van Luytelaar, A.A. Ovchinnikov, E.Y. Sitnikov, A.E. Khramov // Proc. of Higher Education. Applied Nonlinear Dynamics. 19, 1 (2011) 86-108.
 18. On-off intermittency of thalamo-cortical oscillations in the electroencephalogram of rats with genetic predisposition to absence epilepsy / E. Sitnikova, A.E. Hramov, V. V. Grubov, A.A. Koronovskii // Proc. of Higher Education. Applied Nonlinear Dynamics. 19, 1 (2011) 86-108.

Луйтелаар, А.А. Овчинников, Е.Ю. Ситникова, А.Е. Храмов // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2011. 19, 1. С. 86-108.

18. On-off intermittency of thalamo-cortical oscillations in the electroencephalogram of rats with genetic predisposition to absence epilepsy / E. Sitnikova, A.E. Hramov, V. V. Grubov, A.A. Ovchinnikov, A.A. Koronovskii // Brain research. 1436 (2012) 147-156.

19. Ситникова Е.Ю. Анализ электрической активности головного мозга при абсансе эпилепсии: прикладные аспекты нелинейной динамики / Е.Ю. Ситникова, А.А. Короновский, А.Е. Храмов // Изв. Вузов. Прикладная нелинейная динамика. 19, 6 (2011) 173-182.

20. Coenen A.M. The WAG/Rij rat model for absence epilepsy: age and sex factors / A.M. Coenen, E.L. Van Luijtelaar // Epilepsy Res. 1(1987) 297-301.

21. An algorithm for real-time detection of spike-wave discharges in rodents / A.A. Ovchinnikov, A. Luttjohann, A. E. Hramov, G. van Luijtelaar // J Neurosci Methods 194 (2010) 172-178.

Грубов Вадим Валерьевич – аспирант, инженер факультета экологии и сервиса, младший научный сотрудник НОЦ «Нелинейная динамика сложных систем» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Короновский Алексей Александрович – доктор физико-математических, ведущий научный сотрудник НОЦ «Нелинейная динамика сложных систем» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Ситникова Евгения Юрьевна – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН

Иванов Алексей Викторович – кандидат геолого-минералогических наук, декан факультета экологии и сервиса Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Храмов Александр Евгеньевич – доктор физико-математических наук, профессор Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Ovchinnikov, A.A. Koronovskii // Brain research. 1436 (2012) 147-156.

19. Sitnikova E.Yu. Analysis of the electrical activity of the brain in absence epilepsy: practical aspects of nonlinear dynamics / E.Yu. Sitnikova, A.A. Koronovskii, A.E. Khramov // Proc. of Higher Education. Applied Nonlinear Dynamics. 19, 6 (2011) 173-182.

20. Coenen A.M. The WAG/Rij rat model for absence epilepsy: age and sex factors / A.M. Coenen, E.L. Van Luijtelaar // Epilepsy Res. 1(1987) 297-301.

21. An algorithm for real-time detection of spike-wave discharges in rodents / A.A. Ovchinnikov, A. Luttjohann, A. E. Hramov, G. van Luijtelaar // J Neurosci Methods 194 (2010) 172-178.

Grubov Vadim V. – postgraduate student, engineer of Faculty of Ecology and Service, junior researcher of the REC “Nonlinear Dynamics of Complex Systems” of Saratov State Technical University named after Gagarin Yu.A.

Koronovskii Aleksey A. – Doctor of Physics and Mathematics, leading researcher of the REC “Nonlinear Dynamics of Complex Systems” of Saratov State Technical University named after Gagarin Yu.A.

Sitnikova Evgenija Yu. – Candidate of Physics and Mathematics, senior researcher of the Institute of the Higher Nervous Activity and Neurophysiology of the Russian Academy of Sciences

Ivanov Aleksey V. – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, the Dean of Faculty of Ecology and Service of Saratov State Technical University named after Gagarin Yu.A.

Khramov Aleksander E. – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of Saratov State Technical University named after Gagarin Yu.A.