



АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ГОЛОВНОГО МОЗГА ПРИ АБСАНС ЭПИЛЕПСИИ: ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ

Е.Ю. Ситникова, А.А. Короновский, А.Е. Храмов

Работа обобщает основные результаты анализа электроэнцефалограмм у крыс с генетической предрасположенностью к абсанс-эпилепсии (линия WAG/Rij). Описаны свойства эпилептической активности в домене частот и в домене времени, исследована динамика эпилептических разрядов, а также изменения структуры электроэнцефалограмм, предшествующие их появлению. Предложены физиологические интерпретации исследуемых явлений, которые могут способствовать лучшему пониманию природы эпилептических расстройств.

Ключевые слова: Частотно-временной анализ ЭЭГ, временная динамика эпилептической активности, сонные веретена, ритмическая активность головного мозга, осцилляторные паттерны ЭЭГ.

Введение

Работа головного мозга строится на непрерывном процессе формирования и разрушения нервных связей. «Нервные связи»* обеспечивают функциональные взаимодействия между нейронными ансамблями, расположенными в разных отделах головного мозга. Показателем установления нервных связей является синхронизация локальных электрических потенциалов головного мозга, которые можно зарегистрировать с поверхности головы (так называемая электроэнцефалограмма, ЭЭГ) [1]. На ЭЭГ можно выделить большое количество разнообразных ритмов и периодических колебаний. Частота этих ритмических составляющих ЭЭГ является важной характеристикой функциональной активности нервных структур. Частотный состав ЭЭГ, характеризующий электрическую активность локальной области головного мозга, может изменяться в зависимости от функциональной активности данной области и от характера её взаимодействий с другими областями.

*Нервные связи – понятие функциональное, однако оно имеет анатомический субстрат – синаптические контакты между нейронами.

Состояние, когда в различных областях головного мозга появляется устойчивая ритмическая активность в определенном диапазоне частот, называется состоянием синхронизации. Впервые идею о том, что синхронизация ритмов на ЭЭГ является прямым отражением установления связей между нейронами и группами нейронов, высказаны В.С. Русиновым [2]. Позднее были сформулированы представления о том, что синхронизация ритмической активности на ЭЭГ может свидетельствовать об обмене информацией между данными структурами и/или об установлении функциональных связей между ними [1,3]. Состояние синхронизации между определенными областями коры является важным атрибутом когнитивной деятельности человека.

1. Гиперсинхронизация на ЭЭГ при эпилепсии

Патологические процессы в центральной нервной системе могут сопровождаться повышением уровня синхронизации между функционально связанными структурами. В экстремальных случаях это может привести к появлению судорожных разрядов на ЭЭГ. В частности, абсанс-эпилепсия, исследованию которой посвящена данная статья, развивается на фоне гиперсинхронной активности нейронов таламо-кортикальной сети (этот вопрос освещен более подробно в разделе 4). Исследования патологической активности таламо-кортикальной системы, сопровождающие развитие абсанс-эпилепсии, скудны и немногочисленны. У человека такое исследование на базе ЭЭГ практически невозможно по этическим соображениям, поскольку оно потребует инвазивной процедуры вживления электродов в таламус, а пациенты, страдающие абсанс-эпилепсией, не имеют клинических показаний для такой операции.

Эта ситуация подтолкнула исследователей к использованию специальных линий лабораторных животных (крысы и мышей) с генетической предрасположенностью к данной форме эпилепсии. Генетические модели абсанс-эпилепсии появились сравнительно недавно, и среди них в последнее десятилетие особую популярность завоевали крысы линии WAG/Rij и GAERS [4]. Судорожная активность формируется у этих животных спонтанно (то есть без использования внешних провоцирующих факторов) и эффективно подавляется лекарственными средствами, используемыми для терапии человека.

В наших экспериментах были использованы крысы линии WAG/Rij. Регистрацию электрической активности головного мозга у животных проводили в свободном поведении с использованием вживленных электродов. Для монополярной записи ЭЭГ были использованы эпидуральные электроды, располагавшиеся во фронтальной, париетальной и затылочной коре. Операцию по вживлению проводили в возрасте от 3 до 5 месяцев под общим хлоралгидратным наркозом.

2. Клиническая и электроэнцефалографическая картина абсанс-эпилепсии

Клиническая картина абсанса у человека может напоминать кратковременную утрату внимания, рассредоточение, легкую дремоту в дневное время, поэтому существует серьезный риск, что эта болезнь останется незамеченной. Частые приступы абсанс-эпилепсии у человека приводят к снижению эффективности обучения, ухудшается общая успеваемость, что даёт почву для развития синдрома дефицита внимания и более серьезных неврологических расстройств (*comorbid conditions*).

Приступы абсанс-эпилепсии сопровождаются появлением высокоамплитудной генерализованной гиперсинхронной пик-волновой активности на ЭЭГ. Сходные абсанс-подобные состояния наблюдаются у крыс линии WAG/Rij (рис. 1).

Пик-волновые разряды на ЭЭГ человека, длительность которых не превышает 2–5 с, обычно не имеют видимых клинических проявлений. Более длительные разряды (до 15–30 с) обычно сопровождаются нарушением сознания и другими симптомами. Структура и топография пик-волновых комплексов у разных пациентов заметно варьирует. При некоторых осложненных формах эпилептических расстройств (например, абсансные судороги во время сна или появление абсанс-эпилепсии в позднем возрасте) в составе пик-волновых комплексов могут наблюдаться множественные пики. Такой энцефалографический паттерн получил название «multiple spike-and-slow-wave complexes».

На ЭЭГ у крыс линии WAG/Rij можно выделить два типа пик-волновых разрядов. К 1-му типу относится генерализованная активность, характерная для абсанс-подобных состояний. К 2-му типу относится 5–7-герцевый ритм, имеющий вид аркообразных волн с преобладанием острого позитивного компонента и локализованный в затылочной коре [5]. Клинический коррелят разрядов 2-го типа которых до сих пор неизвестен. Два типа пик-волновых разрядов отличаются по частоте и амплитуде, а также имеют разную чувствительность к нейромодуляторам и демонстрируют разную динамику в онтогенезе.

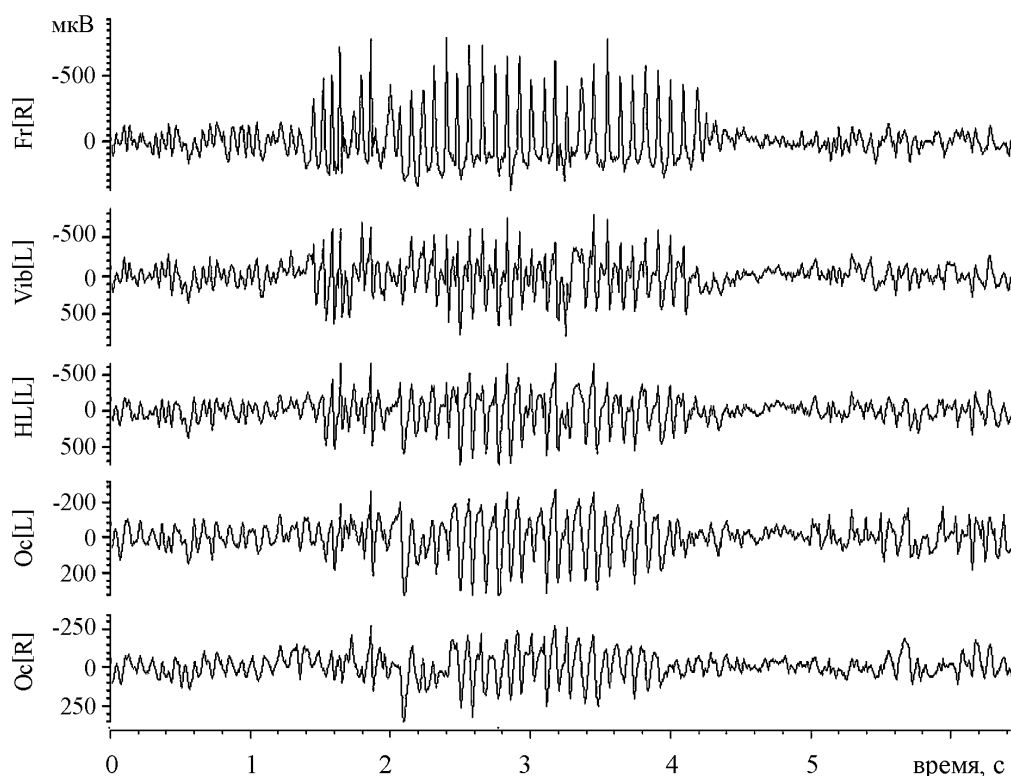


Рис. 1. Характерные для абсанс-эпилепсии гиперсинхронные пик-волновые разряды у крысы линии WAG/Rij (самец, возраст 11 мес). Обозначения каналов ЭЭГ (здесь R–right (правое полушарие), L–left (левое полушарие)): Fr[R] – лобная кора; Vib[L] – соматосенсорная кора, область вибрисс; HL[L] – соматосенсорная кора, область нижних конечностей; Oc[L] и Oc[R] – затылочная кора

Структура пик-волновых разрядов

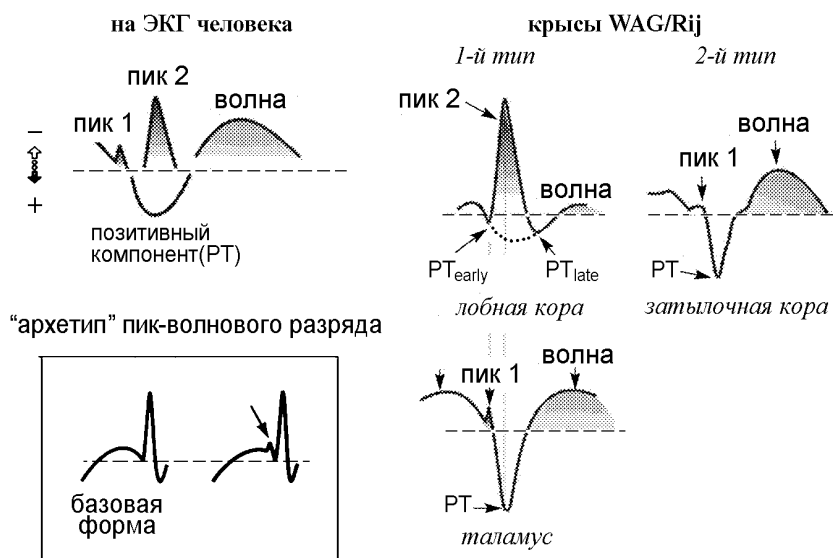


Рис. 2. Пик-волновой комплекс человека состоит из так называемых «эпилептиформных элементов» (по определению Weir, 1965): пик 1 – ранний негативный пик, РТ – позитивный компонент; пик 2 – поздний высокоамплитудный пик и негативная «волна». Данная схема применима к пик-волновым разрядам крыс линии WAG/Rij, у которых разряды 1 и 2-го типов состоят из элементов, аналогичных таковым у человека [6]

Было проведено электроэнцефалографическое исследование формы потенциала пик-волновых разрядов обоих типов у крыс линии WAG/Rij в соответствии со схемой, принятой в клинической электроэнцефалографии [6]. В результате было выявлено несколько эпилептиформных элементов в составе пик-волновых разрядов: «пик 1», «пик 2», «позитивный компонент» и «волна» (рис. 2). Показано, что пик-волновые разряды у крыс линии WAG/Rij состоят из элементов, характерных для пик-волновых комплексов человека. Это свидетельствует о аналогичных проявлениях судорожной активности у данной генетической модели (крысы линии WAG/Rij) и у пациентов с абсанс-эпилепсией.

Каждый отдельный цикл пик-волнового комплекса содержит один пик и одну волну. Увеличение числа пиков в составе пик-волнового комплекса до трех и более на одну волну свидетельствует о неблагоприятном прогнозе. Известно, что появление множественных пиков в составе пик-волновых комплексов вызвано нарушением внутрикортикальных взаимосвязей и повышением возбудимости кортикальных нейронов. Сложная структура пик-волновых разрядов, по всей вероятности, является отражением локальных процессов возбуждения-торможения в коре во время абсанс-эпилепсии и в большой степени зависит от уровня синхронизации нейронной активности или от уровня возбуждения, поступающего из подкорковых структур (таламуса).

3. Диагностика начала абсанс-эпилепсии с использованием данных ЭЭГ

Особенностью абсанс-эпилепсии у человека является отсутствие клинических и электроэнцефалографических признаков, по которым можно было бы предсказать начало эпилептических разрядов. По-видимому, состояние, предшествующее гиперсинхронным пик-волновым разрядам, формируется под влиянием совокупности раз-

нообразных факторов, контролирующих внутренние процессы в нервной системе (возбудимость нейронов), а также внешних факторов (медикаментозное вмешательство, изменение длительности и качества сна и т.п.). У больных эпилепсией в некоторых случаях удавалось зафиксировать некоторые изменения формы, амплитуды и частоты фоновой ЭЭГ за несколько секунд до начала пик-волновых разрядов, свидетельствующие о небольшом снижении уровня бодрствования, на фоне которого возникали гиперсинхронные разряды. Никаких особых изменений на ЭЭГ перед началом судорожной активности обнаружено не было.

Непрерывный вейвлетный анализ пик-волновых разрядов, проведенный нами с помощью комплексного вейвлета Морле [8], показал, что появлению пик-волновых разрядов на ЭЭГ предшествовала совокупность коротких ритмических компонентов, максимальная мощность которых в диапазоне дельта 3–5 Гц и тета/альфа-частот 7–11 Гц (рис. 3) [9]. Низкочастотные, то есть дельта-компоненты, предшествовали приблизительно 90% пик-волновых разрядов, тета/альфа-компоненты – 92%. Средняя длительность предшественников разрядов составляла примерно полсекунды. Лишь у 5% пик-волновых разрядов ритмические предшественники на ЭЭГ отсутствовали. Эти разряды появлялись на ЭЭГ на фоне десинхронизации. В 89% случаев перед началом пик-волновых разрядов обнаруживали оба компонента (дельта и тета/альфа). Такая ситуация была нетипична для фоновой ЭЭГ. Эпизоды времени, на протяжении которых дельта- и тета-компоненты присутствовали одновременно на фоновой ЭЭГ, составляло около 2–12% от общего числа проанализированных эпох (табл.).

Если тета/альфа-компонент обнаруживался в коре и в таламусе практически одновременно, тогда дельта-компонент появлялся в таламусе с небольшой, но достоверной задержкой относительно коры (примерно, 0,5 с). Появление дельта-активности в коре до начала пик-волнового разряда может служить своеобразным триггером, при срабатывании которого таламо-кортикальная сеть переходит в режим генерации гиперсинхронного эпилептического ритма. Более подробное обсуждение

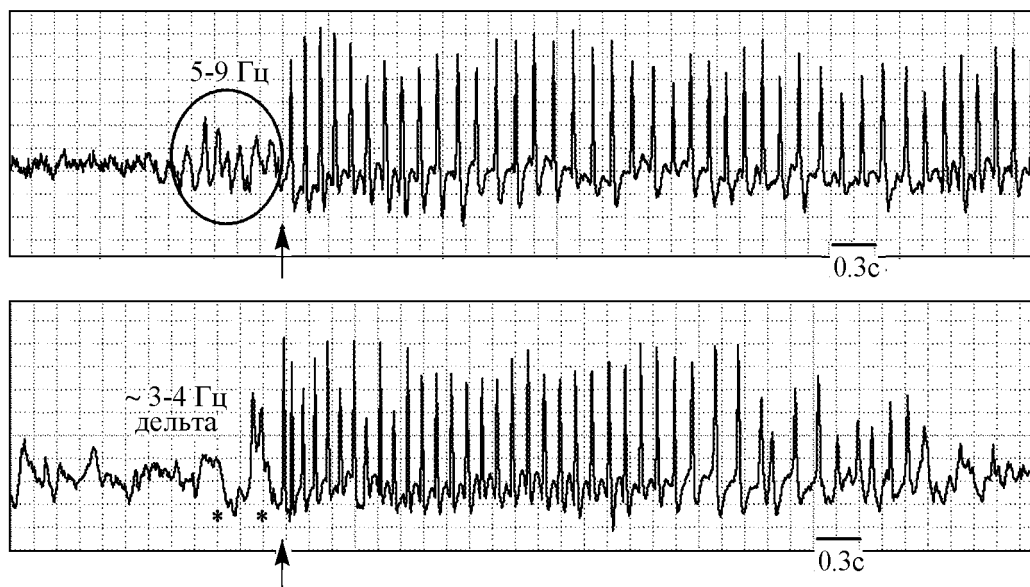


Рис. 3. Особенности структуры ритмической активности на ЭЭГ непосредственно перед началом пик-волновых разрядов (обозначено стрелочками). Наиболее типичным является наличие осцилляций в диапазоне 5–9 Гц (тета/альфа-предшественник), а также 3–4 Гц компонента (дельта-предшественник)

Таблица

Одновременное появление дельта- и тета/альфа-компонентов на ЭЭГ у крыс линии WAG/Rij

Физиологическое состояние	% дельта+тета/альфа-компонентов
Перед началом эпилептических разрядов	79.0
Активное бодрствование	8.6
Пассивное бодрствование	12.9
Поверхностный сон	9.3
Глубокий сон	2.2

нейронных механизмов формирования медленно-волнового компонента и эпилептогенной природы дельта-предшественника представлено в работе [9].

Описанный нами тета/альфа-предшественник, средняя частота которого составила 8.6 Гц, в определенном смысле может оказаться аналогом 5–9-герцевого предвестника эпилептических разрядов, описанного ранее у крыс линии GAERS [10]. Что касается медленно-волнового предшественника абсанс-эпилепсии, то это совершенно новый проэпилептический элемент на ЭЭГ. О существовании подобного элемента нет упоминаний ни в работах на крысах линии GAERS, ни на других моделях, ни на человеке.

4. Системные механизмы таламо-кортикальных осцилляций

Помимо пик-волновых разрядов, таламо-кортикальная нервная сеть генерирует нормальные осцилляции – сонные веретена во время медленной фазы сна (рис. 4). Необходимо отметить, что таламо-кортикальные осцилляции (и нормальные, и патологические) имеют частоту 8–14 Гц, что соответствует диапазону альфа-частот. Известно, что неокортекс играет ключевую роль в формировании пик-волновых разрядов, а таламус генерирует сонные веретена. Осцилляции обоих типов поддерживаются и контролируются нейросетевыми механизмами таламо-кортикальной сети и способны распространяться за её пределы благодаря анатомическим связям с другими областями головного мозга.

При исследовании характера распределения стереотипных таламо-кортикальных осцилляций на ЭЭГ мы использовали математический аппарат нелинейной динамики и теории динамического хаоса [11], которые оперируют понятием «*on-off*»

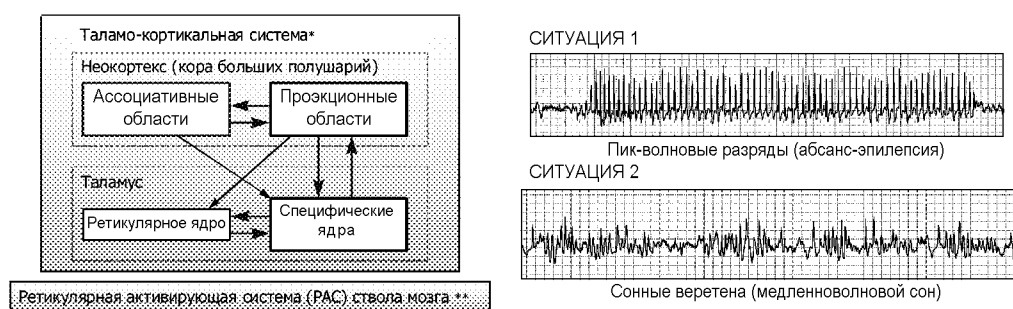


Рис. 4. Схема таламо-кортикальной сети, участвующей в формировании сонных веретен и пик-волновых разрядов. В модели «*on-off* перемежаемости» таламо-кортикальная система соответствует осциллирующей подсистеме (*), а ретикулярная активирующая система соответствует управляющей подсистеме (**)

перемежаемости» [11–13]. Этот подход применяется в физике для описания последовательности чередующихся нерегулярных событий на фоне относительно стабильной активности вблизи точек бифуркаций. В нашем случае была исследована электрическая активность коры больших полушарий, где длительные эпизоды низкоамплитудной полиритмической активности (фоновая ЭЭГ) чередовались с всплесками высокоамплитудной активности с относительно стабильной частотой, которые соответствовали либо эпилептическим разрядам, либо сонным веретенам. У каждого животного (всего 6 крыс) исследовали закономерности распределения значений периодов времени L между событиями, то есть между эпилептическими разрядами либо между сонными веретенами. Статистическое распределение величин L было аппроксимировано степенной функцией $N(L) = DL^a$, где $N(L)$ – количество интервалов длительностью L в заданном диапазоне, D – параметр нормирования. Показатель степени « a » подбирался так, чтобы ошибка аппроксимации была минимальной. Анализ большого количества экспериментальных данных показал, что распределение интервалов длительностью L между пик-волновыми разрядами и типичными сонными веретёнами соответствовало степенной функции с показателем степени $a = -3/2$, что характерно для «*on-off* перемежаемости». Технические аспекты этого исследования подробно изложены в работах [14–16] и в обзоре [17].

Для более полного понимания природы этого явления с позиции нейрофизиологии, предлагаем следующее объяснение данного феномена.

Из теории динамических систем и нелинейной динамики известно, что система, в которой возникает «*on-off* перемежаемость», может иметь иерархическую организацию и состоять из двух подсистем: управляющий и управляемой. В нашем случае, управляемой (осциллирующей) подсистемой является таламо-кортикальная сеть, которая способна генерировать сонные веретена, находясь в состоянии синхронизации, или пик-волновые разряды – в состоянии гиперсинхронизации (см. рис. 4). Вторая (управляющая) подсистема принадлежит к более высокой иерархии. Эта роль может принадлежать ретикулярной активирующей системе ствола мозга, поскольку именно эта система регулирует процессы сна и бодрствования, постоянно «подбуживая» кору и таламус и таким образом поддерживая состояние бодрствования. При снижении влияния ретикулярной активирующей системы нейроны таламуса переходят в режим генерации «пачек» импульсов. Уровень синхронизации в таламо-кортикальной сети постепенно возрастает, формируется состояние сна, и на ЭЭГ появляется сонно-веретённая активность. Управляющая подсистема влияет на состояние осциллирующей подсистемы посредством контролирующих параметров, которыми могут являться нейромедиаторы (ацетилхолин и норадреналин). Их концентрация снижается по мере снижения уровня бодрствования. Когда концентрация нейромедиаторов окажется ниже порогового значения, поведение таламо-кортикальной системы принципиально изменяется: тоническая активация нейронов сменяется «пачечной» активностью. Дальнейшая ситуация может развиваться по двум сценариям в зависимости от чувствительности нейронов коры к влиянию ретикулярной активирующей системы ствола мозга. Сонные веретена (Ситуация 2 на рис. 4) появляются, когда нейроны коры обладают высокой чувствительностью к снижению холин- и адренэргической иннервации. В этом случае главную роль в формировании сонных веретен играет таламус, а возбудимость коры остается низкой. Если нейроны коры оказываются менее чувствительны к снижению холин- и адренэргической иннервации, возбудимость коры сохраняется на высоком уровне, и в ответ на «пачки» импульсов от таламуса нейроны коры могут генерировать гиперсинхронные разряды (Ситуация 1 на рис. 4).

Заключение

Использование мощных средств физико-математического анализа применительно к ЭЭГ в настоящее время даёт возможность установить сложные закономерности работы мозга. Однако трактовка результатов математического анализа с позиций нейробиологии зачастую оказывается сложной и неоднозначной. Результат, столь очевидный для математика, может показаться физиологу лишённым смысла и поставить его (физиолога) в тупик. Сложности в интерпретации результатов математического анализа обусловлены некоторым отчуждением, которое до сих пор существует между биологическими и физико-математическими науками. Хотелось бы верить, что новые знания, рожденные на стыке этих фундаментальных наук, будут способствовать росту взаимопонимания и взаимопроникновению этих дисциплин и, в конечном итоге, помогут решить многочисленные загадки ЭЭГ.

Как справедливо заметили А.М. Иваницкий и А.И. Лебедев [18, с. 639] в статье о научном наследии М.Н. Ливанова: «Наибольший эффект от соединения математики и физиологии получается тогда, когда в основе применения того или иного математического преобразования лежит плодотворная физиологическая идея». Действительно залогом успеха междисциплинарного направления в современной нейробиологии является четкость и осмысленность в постановке физиологических задач.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 09-04-01302-а), а также Президентской Программы поддержки ведущих научных школ Российской Федерации. А.А. Короновский благодарит фонд некоммерческих программ «Династия».

Библиографический список

1. Ливанов М.Н. Пространственная организация процессов головного мозга. М.: Наука, 1972. 181 с.
2. Русинов В.С. Некоторые вопросы теории электроэнцефалограммы. Физиология. Л., 1954. С. 235.
3. Свидерская Н.Е. Синхронная электрическая активность мозга и психические процессы. М.: Наука, 1987. 156 с.
4. Depaulis A., van Luijtelaar E.L.J.M. Genetic models of absence epilepsy in the rat // Models of seizures and epilepsy. Amsterdam: Elsevier Academic Press, 2005. P. 233.
5. Мидзяновская И.С. Два типа разрядов «пик-волна» на электроэнцефалограмме крыс линии WAG/Rij, генетической модели absence эпилепсии // Журн. высш. нерв. деят. 1999. Т. 49, № 5. С. 855.
6. Weir B. The morphology of the spike-wave complex // Electroencephalogr. Clinical Neurophysiol. 1965. Vol. 19. P. 284.
7. Sitnikova E., van Luijtelaar G. Electroencephalographic characterization of spike-wave discharges in cortex and thalamus in WAG/Rij rats // Epilepsia. 2007. Vol. 48, № 12. P. 2296.

8. *Короновский А.А., Храмов А.Е.* Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения. М.: Физматлит, 2003.
9. *van Luijteleaar G., Hramov A., Sitnikova E., Koronovsky A.* Spike-wave discharges in WAG/Rij rats are preceded by delta and theta precursor activity in cortex and thalamus // *Clin. Neurophysiol.* 2011. Vol. 122, № 4. P. 687.
10. *Pinault D., Vergnes M., Marescaux C.* Medium-voltage 5–9 Hz oscillations give rise to spike-and-wave discharges in a genetic model of absence epilepsy: In vivo dual extracellular recording of thalamic relay and reticular neurons // *Neurosci.* 2001. Vol. 105. P. 181.
11. *Кузнецов С.П.* Динамический хаос. Курс лекций. М.: Физматлит, 2001.
12. *Heagy J.F., Platt N., Hammel S.M.* Characterization of on-off intermittency // *Phys. Rev. E.* 1994. Vol. 49. P. 1140.
13. *Platt N., Spiegel E. A., Tresser C.* On-off intermittency: A mechanism for bursting // *Phys. Rev. Lett.* 1993. Vol. 70. P. 279.
14. *Короновский А.А., Минюхин И.М., Тыщенко А.А., Храмов А.Е., Мидзяновская И.С., Ситникова Е.Ю., van Luijteleaar G., van Rijn C.M.* Применение непрерывного вейвлет-преобразования для анализа перемежающегося поведения // *Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика.* 2007. Т. 15, № 4. С. 34.
15. *Короновский А.А., Кузнецова Г.Д., Мидзяновская И.С., Ситникова Е.Ю., Трубецков Д.И., Храмов А.Е.* Закономерности перемежающегося поведения в спонтанной неконвульсивной судорожной активности у крыс // *ДАН.* 2006. Т. 409. С. 274.
16. *Hramov A.E., Koronovskii A.A., Midzyanovskaya I.S., Sitnikova E., van Rijn C.M.* On-off intermittency in time series of spontaneous paroxysmal activity in rats with genetic absence epilepsy // *Chaos.* 2006. Vol. 16. P. 043111.
17. *Короновский А.А., van Luijteleaar G., Овчинников А.А., Ситникова Е.Ю., Храмов А.Е.* Диагностика и анализ осцилляторной нейросетевой активности головного мозга с использованием непрерывного вейвлетного преобразования // *Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика.* 2011. Т. 19, № 1. С. 86.
18. *Иваницкий А.М., Лебедев А.И.* Разгадывая тайны ритмов мозга // *Журн. высш. нервн. деят.* 2007. Т. 57, № 5. С. 636.

*Институт высшей нервной деятельности Поступила в редакцию 30.06.2011
и нейрофизиологии РАН, Москва
Саратовский госуниверситет*

ANALYSIS OF EPILEPTIC ACTIVITY OF BRAIN IN CASE OF ABSENCE EPILEPSY: APPLIED ASPECTS OF NONLINEAR DYNAMICS

E.Yu. Sitnikova, A.A. Koronovskii, A.E. Hramov

The paper summarizes the main results of analysis of electroencephalograms in rats with genetic predisposition to absence epilepsy (WAG/Rij rat strain). Properties of epileptic activity are described in time and in frequency domains; dynamics of epileptic

activity is investigated, as well as changes in electroencephalogram structure prior to epileptic discharges. Physiologic interpretation of the investigated phenomena helps in better understanding of the nature of the investigated phenomena.

Ключевые слова: Time-frequency analysis of EEG, epileptic activity, sleep spindles, rhythmic activity of brain, oscillation pattern of EEG.



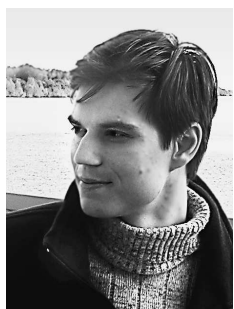
Ситникова Евгения Юрьевна – родилась в Волгограде (1974). Окончила ветеринарно-биологический факультет Московской академии ветеринарной медицины и биотехнологии им. К.И.Скрябина (1996), кандидат биологических наук (специальность 03.00.13 - физиология), PhD (Social science, Radboud University Nijmegen, Нидерланды, 2008). Старший научный сотрудник Учреждения Российской Академии Наук Института высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН. Научные интересы - междисциплинарные исследования функций мозга. Автор около 40 научных работ, опубликованных в отечественных и международных журналах.

117485 Москва, ул. Бултерова, 5А
Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН
E-mail: eu.sitnicova@gmail.com



Короновский Алексей Александрович – родился в Саратове (1972). Окончил физический факультет Саратовского государственного университета (1995), доктор физико-математических наук (2007), профессор кафедры физики открытых систем СГУ. Область научных интересов – синхронизация, нелинейная динамика и ее проявления в различных сферах человеческой деятельности, в том числе нелинейная динамика социально-экономических процессов. Автор ряда статей в центральной печати, а также монографий (в соавторстве) «Нелинейная динамика в действии» и «Непрерывный вейвлетный анализ», вышедших в Издательстве ГосУНЦ «Колледж», двухтомной монографии «Методы нелинейной динамики и теории хаоса в задачах электроники сверхвысоких частот» (М.: Физматлит, 2009, под редакцией А.А. Короновского, А.А. Кураева, Д.И. Трубецкова и А.Е. Храмова), монографии «Моделирование нелинейной динамики глобальных процессов» (М.: Изд-во МГУ, 2010, под редакцией С.И. Ильина и Д.И. Трубецкова) и др.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: alkor@nonlin.sgu.ru



Храмов Александр Евгеньевич – окончил физический факультет Саратовского госуниверситета (1996). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата (1999) и доктора (2006) физ.-мат. наук. Профессор, заместитель заведующего кафедрой электроники, колебаний и волн факультета нелинейных процессов СГУ. Область научных интересов – радиофизика в той ее части, которая связана со взаимодействием свободных электронов с электромагнитными полями, нелинейная динамика распределенных активных сред, методы анализа и моделирования динамических систем. Опубликовал (в соавторстве) книгу «Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков» (Т. 1, М.: Физматлит, 2003; Т. 2, М.: Физматлит, 2004), монографию «Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения» (Москва: Наука, Физматлит, 2003), двухтомную коллективную монографию «Методы нелинейной динамики и теории хаоса в задачах электроники сверхвысоких частот» (М.: Физматлит, 2009), коллективную монографию «Моделирование нелинейной динамики глобальных процессов» (М.: Изд-во МГУ, 2010) и др.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: aeh@nonlin.sgu.ru