

ОРИГИНАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

УДК 612.821.6

ИЗУЧЕНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РИТМИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТОВ
ЭЭГ НА ПЕРВОЙ СТАДИИ ДНЕВНОГО СНА

И.А. Яковенко*, Д.Е. Шумов, Н.Е. Петренко, М.К. Козлов, В.Б. Дорохов

*Лаборатория нейробиологии сна и бодрствования, Институт высшей нервной деятельности и
нейрофизиологии РАН, Россия, 117485, г. Москва, Бутлерова, д. 5а
e-mail: irinayakovenko@mail.ru

Взаимодействие ритмов энцефалограммы (ЭЭГ) является важным показателем функционального состояния мозга человека. В настоящее время существуют три теории, объясняющие такое взаимодействие: а) коммуникация нейронных популяций; б) нейронное взаимодействие; в) взаимодействие генераторов изучаемых частот. Известно, что тета-ритм связывают с функционированием кортико-гиппокампальной системы, альфа-ритм — таламо-кортикальной, а бета-ритм — может быть включен в работу обеих корково-подкорковых систем. Представленная работа может прояснить особенности взаимодействия вышеописанных корково-подкорковых систем. Существует ряд публикаций, посвященных изучению взаимодействия ритмов ЭЭГ при различных видах психической деятельности. При этом в последние годы возник интерес к связи ритмов на разных стадиях сна. В задачу нашей работы входило изучение взаимодействия тета-, альфа- и бета-ритмов ЭЭГ на первой стадии сна. В исследовании приняли участие 22 испытуемых в возрасте от 18 до 22 лет. Регистрировалась многоканальная ЭЭГ во время дневного сна участников эксперимента. Для обработки выбирали отрезки ЭЭГ с хорошо выраженным тета-ритмом, поскольку он является «доминирующим» на первой стадии сна. Затем осуществлялась диапазонная фильтрация сигнала ЭЭГ. Были выделены следующие ритмы: тета-ритм (4–7 Гц), альфа-ритм (8–13 Гц), бета-1- (14–19 Гц) и бета-2-ритмы (20–25 Гц). После этого для каждого диапазона на каждой секунде вычислялась средняя амплитуда как корень квадратный из дисперсии сигнала ЭЭГ. В качестве меры, оценивающей взаимодействие ритмов ЭЭГ, использовали коэффициент корреляции Пирсона. В результате было установлено, что первая стадия сна характеризуется: а) отсутствием связей тета-ритма с другими ритмами; б) наличием связей альфа-бета-1-, альфа-бета-2- и бета-1-бета-2-ритмов-; в) ростом амплитуды тета-ритма; г) снижением амплитуд альфа- и бета-ритмов. Как уже отмечалось выше, тета-ритм связывают с функционированием кортико-гиппокампальной системы, а альфа-ритм — таламо-кортикальной. В нашей работе показаны два сосуществующих вида функционирования этих систем: 1) «независимый» кортико-гиппокампального круга и 2) связанный с другими ритмами, в частности, с бета-ритмом, таламо-кортикальный. Вероятно, эта неоднородность является условием того, что первая стадия сна может быть нестабильной. Показано увеличение амплитуды тета-ритма на первой стадии сна, по отношению к этому показателю в состоянии спокойного бодрствования. Это традиционно связывается с увеличением восходящих влияний лимбических структур мозга. Амплитуды альфа- и бета-ритмов на первой стадии сна достоверно уменьшились, что говорит об ослаблении влияния префронтальных отделов коры на центры заднего гипоталамуса. Исходя из этого, можно предположить, что наступление первой стадии сна может обеспечиваться разнородным характером взаимодействия ритмов, и, соответственно, различным функционированием кортико-гиппокампальной и таламо-кортикальной систем.

Ключевые слова: взаимодействие ритмов ЭЭГ, альфа-ритм, тета-ритм, бета-ритм, средняя амплитуда ритмов ЭЭГ, таламо-кортикальная система, кортико-гиппокампальная система, первая стадия сна

Проблема исследования взаимодействия ритмов электроэнцефалограммы (ЭЭГ) в настоящее время является актуальной. Когнитивные процес-

сы мозга требуют скоординированной активности нейронных сетей, участвующих в генерации ритмов ЭЭГ, которые, в свою очередь, обеспе-

чивают высшие психические функции человека. Предполагается, что в ЭЭГ это отражается в виде координации активности в разных частотных диапазонах [1]. В работах де Мунка и Рупун [2, 3] показано взаимодействие альфа- и бета-ритмов. Осцилляторы альфа- и бета-ритмов «включаются» и «выключаются» одновременно; бета-1- и бета-2-ритмы могут генерировать альфа-ритм. Показано, что у больных с нейрогенной болью, эпилепсией и двигательными расстройствами существует взаимодействие тета- и бета-ритмов активности ядер таламуса. Делается предположение о строгом функциональном взаимодействии генераторов этих ритмов [4]. В состоянии спокойного бодрствования у пациентов с болезнью Альцгеймера выявлено увеличение взаимодействия быстрых (бета-/гамма-) и медленных (дельта-/тета-/альфа-) ритмов ЭЭГ по сравнению со здоровыми испытуемыми [5].

В наших работах, посвященных изучению когнитивной установки, была выявлена связь альфа- и бета-2-ритмов у студентов с ригидной формой установки и взаимодействие бета-2- и тета-ритмов у студентов с пластичной формой когнитивной установки [6].

В настоящее время существует три объяснения взаимодействия различных ритмов ЭЭГ: а) коммуникация нейронных популяций; б) нейронное взаимодействие; в) взаимодействие генераторов изучаемых частот [7]. Базируясь на первом объяснении, мы высказали предположение о том, что при усилении корреляционных связей между ритмами осуществляется взаимодействие различных популяций нейронов, генерирующих различные ритмы, внутри одной корково-подкорковой системы, объединяя ее разные структуры, или же объединяя структуры двух или более корково-подкорковых систем.

В последнее время появился ряд работ по исследованию взаимодействия ритмов ЭЭГ во сне [8–10]. Выявлен факт взаимодействия быстрых и медленных ритмов на третьей стадии сна [11]. Показано взаимодействие тета- и гамма-ритмов в парадоксальной стадии сна [12]. В нашей работе, проведенной на студентах с нарушениями сна, выявлено отсутствие связей альфа- и тета-ритмов с бета-ритмом при выполнении задания на распознавание эмоционального выражения лица [13].

Первая стадия сна — переходная стадия от бодрствования ко сну. Она интересна тем, что в ней могут сохраняться как ЭЭГ-характеристики состояния спокойного бодрствования, так и проявляться особенности ЭЭГ, характерные для сна. Классически первая стадия сна характеризуется снижением мощности альфа-ритма и усилением тета-ритма [14]. В связи с этим возникает закономерный интерес к особенностям взаимодействия

ритмов ЭЭГ на первой стадии сна.

Задачей проведенной работы являлась оценка амплитудного взаимодействия тета-, альфа- и бета-ритмов ЭЭГ на первой стадии сна, а также исследование изменения ритмических связей в состоянии спокойного бодрствования.

Материалы и методы

В эксперименте приняли участие 22 испытуемых, студенты медицинского университета (12 мужчины и 10 женщин в возрасте от 18 до 22 лет, средний возраст которых составлял $19,8 \pm 0,8$ года). Перед началом эксперимента испытуемым предлагался опросник «САН», который фиксировал их функциональное состояние, качество ночного сна определяли с помощью Каролинской шкалы сонливости. Участники подписывали информированное согласие на участие в эксперименте. Эксперимент проводился в дневное время, с 13 до 16 часов. Из 22 участников для выделения стадий сна использованы данные 16 человек. У 6 испытуемых не наступала первая стадия сна или не удалось зарегистрировать безартефактную ЭЭГ. Испытуемый находился в звукозаглушающем, защищенном от света помещении, при стабильной температуре 24°C . В течение опыта шла запись с частотой дискретизации 500 Гц 16-ти каналов ЭЭГ, расположенных на скальпе по схеме 10–20, и 2-х каналов электроокулограммы (ЭОГ), при помощи беспроводного аппаратно-программного комплекса «Нейрополиграф 24» (ПО «Нейротех», Россия). Отведение ЭЭГ монополярное.

После наложения электродов испытуемый располагался на кушетке. Далее 3 мин велась фоновая регистрация ЭЭГ и ЭОГ при закрытых глазах. Затем в течение 20 мин регистрировалась ЭЭГ сна. На протяжении этого времени у испытуемых развивалась первая стадия сна, которая наступала в разное время. Первая и вторая стадии сна определялись по стандартным критериям [15]. Анализировала каждые 20 с зарегистрированной ЭЭГ. Первая стадия сна характеризуется снижением мощности альфа-ритма и усилением тета-ритма. Для контроля временных границ первой стадии сна определяли время наступления второй стадии сна, характеризующейся наличием не менее одного сонного веретена, что является основным критерием ее наступления. Это, в свою очередь, являлось окончанием первой стадии. Длительность первой стадии у разных испытуемых была очень вариабельна. Находили наименьшую длительность первой стадии. Изучались 20–30-секундные безартефактные отрезки ЭЭГ первой стадии сна. Поскольку у большинства испытуемых она была больше, для статистического анализа брали отрезки ЭЭГ упомянутой длительности. Отрезки ЭЭГ выбирали с наиболее выраженным тета-ритмом,

поскольку он является «доминирующим» на первой стадии сна. Далее производилась диапазонная фильтрация сигнала ЭЭГ: выделялись тета-ритм (4–7 Гц), альфа-ритм (8–13 Гц), бета-1- (14–19 Гц) и бета-2-ритм (20–25 Гц). Отдельно для фильтрации по каждому диапазону посекундно вычислялась средняя амплитуда как корень квадратный из дисперсии ЭЭГ-сигнала. Этот метод оценки изменений амплитуды по диапазонам является более экономичным по объему необходимых вычислений в сравнении с ранее использованным нами [6] вейвлет-преобразованием.

Для статистического анализа использовали средние значения амплитуд изучаемых ритмов ЭЭГ. Их вычисляли по значениям величин функции вариации соответствующих ритмов, усредненных на 20–30 одnoseкундных отрезках ЭЭГ. Так же проводилось усреднение по всем регистрируемым отведениям ЭЭГ.

Для оценки статистической значимости результатов использовали дисперсионный анализ (ANOVA RM). В качестве внутригруппового фактора рассматривали фактор «состояние» (2 уровня: состояние спокойного бодрствования и первая стадия сна). Оценивалась значимость его влияния для каждого исследуемого ритма отдельно. Разница амплитуд исследовалась так же с помощью парного критерия Стьюдента.

В качестве меры, оценивающей взаимодействие двух поддиапазонов бета-ритма с тета- и альфа-ритмами, использовали коэффициент корреляции Пирсона. Коэффициент корреляции изучаемых ритмических диапазонов вычислялся отдельно для разных исследуемых ситуаций: состояние спокойного бодрствования; первая стадия сна. Статистическая обработка проводилась с помощью пакета программ «SPSS, v.13» (SPSS Inc. IBM, США).

Результаты

Проведено сравнение взаимодействий тета-, альфа-, бета-1- и бета-2-ритмов ЭЭГ в состоянии спокойного бодрствования (фон с закрытыми глазами) и на первой стадии сна. В состоянии спокойного бодрствования с закрытыми глазами в эксперименте выявлено наибольшее число связей ритмов: тета-ритм взаимодействовал с альфа-ритмом и обоими поддиапазонами бета-ритма, альфа-ритм — с тета- и бета-ритмами, а также оба поддиапазона бета-ритма — друг с другом (табл. 1).

На первой стадии сна показано значительное уменьшение числа связей ритмов по сравнению с состоянием спокойного бодрствования. Выявлено три пары связей: альфа — бета-1, аль-

Таблица 1

Корреляция ритмов ЭЭГ по их средней амплитуде в состоянии спокойного бодрствования с закрытыми глазами

Этапы исследования	Ритмы ЭЭГ	Статистические значения
Спокойное бодрствование	тета — бета-1	$r=0,63$; $P=0,012$
	тета — бета-2	$r=0,69$; $P=0,005$
	альфа — бета-1	$r=0,72$; $P=0,002$
	альфа — бета-2	$r=0,73$; $P=0,002$
	альфа — тета	$r=0,74$; $P=0,001$
	бета-1 — бета-2	$r=0,85$; $P=0,000$

фа — бета-2 и бета-1 — бета-2 (табл. 2). Причиной уменьшения связей является отсутствие связей тета-ритма с быстрыми ритмами.

Дисперсионный анализ (ANOVA RM) показал, что фактор «состояние» оказывает значимое влияние на суммарные значения амплитуд тета- ($F(1;12)=7,42$; $P=0,018$), альфа- ($F(1;12)=14,01$; $P=0,003$), бета-1- ($F(1;12)=14,91$; $P=0,002$) и бета-2- ($F(1;12)=36,00$; $P=0,0001$) ритмов. Таким образом, амплитудные показатели исследуемых ритмов значимо изменяются при переходе от фо-

Таблица 2

Корреляция ритмов ЭЭГ по их средней амплитуде на первой стадии сна

Этапы исследования	Ритмы ЭЭГ	Статистические значения
Спокойное бодрствование	тета — бета-1	
	тета — бета-2	
	альфа — бета-1	$r=0,73$; $P=0,001$
	альфа — бета-2	$r=0,83$; $P=0,000$
	альфа — тета	
	бета-1 — бета-2	$r=0,90$; $P=0,000$

нового состояния с закрытыми глазами к первой стадии сна.

Для выяснения характера изменений амплитудных характеристик ЭЭГ было проведено парное сопоставление (по критерию Стьюдента)

Таблица 3

Статистические различия средних значений амплитуды в диапазоне тета-, альфа- и бета-ритмов на разных этапах исследования

Ритмы ЭЭГ	Спокойное бодрствование	Первая стадия сна	Статистические значения
тета — ритм	6,24±0,36	7,31±0,36	$t=4,21$; $P=0,001$
альфа — ритм	11,82±1,42	6,66±0,82	$t=-3,83$; $P=0,002$
бета-1 — ритм	4,98±0,48	3,71±0,31	$t=-3,23$; $P=0,007$
бета-2 — ритм	3,44±0,22	2,50±0,23	$t=-5,77$; $P=0,000$

средних значений амплитуд исследуемых ритмов в состоянии спокойного бодрствования и на первой стадии сна (табл. 3). Показаны достоверные различия амплитуд ритмов в исследуемых состояниях. Выявлено достоверное увеличение амплитуды тета-ритма в первой стадии сна. При этом отмечено уменьшение амплитуд альфа-ритма и поддиапазонов бета- ритма.

Итак, первая стадия сна характеризовалась: а) отсутствием связей тета-ритма с другими ритмами; б) ростом амплитуды тета-ритма; в) снижением амплитуд альфа- и бета-ритмов.

Обсуждение результатов

Взаимодействие ритмов ЭЭГ является информативной характеристикой для определения функционального состояния испытуемых. В нашей ранней работе [6] показана связь бета-ритма с альфа- и тета-ритмами при выработке когнитивной установки. В работе, выполненной на студентах, с нарушения сна, выявлено отсутствие связей бета-ритма с альфа- и тета-ритмами при формировании когнитивной установки [13]. Известно, что бета-ритм может регистрироваться не только в коре больших полушарий, но и в структурах таламуса и гиппокампа [16, 17]. Традиционно таламо-кортикальную и кортико-гиппокампальную корково-подкорковые системы связывают с появлением в ЭЭГ соответственно альфа- и тета-ритмов. Вероятно, включение бета-ритма в комплексы «бета — альфа» и «бета — тета» позволяет поддерживать необходимый уровень активации этих корково-подкорковых систем для осуществления психической деятельности. В работе, посвященной изучению взаимодействия ритмов во сне [8], показано, что наибольшее число связей ритмов наблюдается на третьей стадии сна, а самое незначительное — в парадоксальной стадии сна, как у здоровых, так и у больных эпилепсией. В работе Ли [10] показано значимое взаимодействие медленных осцилляций (0,1–1,5 Гц) и веретен (12–16 Гц) от первой к четвертой стадии сна.

В нашей работе исследовалось взаимодействие ритмов на первой стадии сна. Было выявлено существенное сокращение связей по сравнению с состоянием спокойного бодрствования с закрытыми глазами. Известно, что первая стадия сна характеризуется уменьшением амплитуды альфа-ритма и ростом — тета-ритма ЭЭГ [14]. Казалось логичным, что «доминирующий» тета-ритм в нашем исследовании будет каким-либо образом связан с другими ритмами. Наше ожидание не оправдалось. При этом сохранились связи альфа- и бета-ритмов. Почему же так происходит? В работе Е [18] высказывается мнение, что уменьшение количества связей ритмов позволяет высвобождать ресурс для объединения изучаемых

ритмов в какие-то другие пары. Возможно, в дальнейших стадиях сна тета-ритм будет интегрирован с каким-то иным ритмом. Первая стадия сна включает в себя характеристики ЭЭГ как сна, так и бодрствования. Вероятно, поэтому при снижении амплитуды альфа- и бета-ритмов сохраняется их связь, которая в последующих стадиях сна может трансформироваться как в более устойчивую, что может привести к просыпанию, так и в менее устойчивую, что в свою очередь приведет к углублению сна.

Как уже отмечалось выше, тета-ритм связывают с функционированием кортико-гиппокампальной системы, а альфа-ритм — таламо-кортикальной. В нашей работе показаны два сосуществующих вида функционирования этих систем: «независимый» кортико-гиппокампального круга и связанный с другими ритмами, — в частности, с бета-ритмом, — таламо-кортикальный. Вероятно, эта неоднородность является условием того, что первая стадия сна может быть нестабильной.

Было проведено изучение зависимости динамики амплитуды изучаемых ритмов ЭЭГ от стадии эксперимента. Показано ожидаемое увеличение амплитуды тета-ритма на первой стадии сна по сравнению с состоянием спокойного бодрствования. Это традиционно связывается с увеличением восходящих влияний лимбических структур мозга. Амплитуды альфа- и бета-ритмов на первой стадии сна достоверно уменьшились, что говорит об ослаблении влияния префронтальных отделов коры на центры заднего гипоталамуса. Эти данные в определенной мере согласуются с результатами, полученными в работе Е [18], в которой отмечено уменьшение мощности бета-ритма по мере увеличения глубины сна.

В заключение можно сказать, что первая стадия сна в эксперименте характеризовалась: а) отсутствием связей тета-ритма с другими ритмами; б) наличием трех пар связей ритмов ЭЭГ: альфа — бета-1, альфа — бета-2 и бета-1 — бета-2; в) ростом амплитуды тета-ритма и снижением амплитуд альфа- и бета-ритмов. На основании этого можно предположить, что наступление первой стадии сна может обеспечиваться разнородным характером взаимодействия ритмов, и, соответственно, различным функционированием кортико-гиппокампальной и таламо-кортикальной систем.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №17-36-00025-ОГН-МОЛ-А1).

Все испытуемые подписывали информированное согласие на участие в исследовании. Протокол исследования был одобрен этической комиссией Института высшей нервной деятель-

ности и нейрофизиологии. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Voytek B., Knight R.T. Dynamic network communication as a unifying neural basis for cognition, development, aging, and disease // *Biol. Psychiatry*. 2015. Vol. 77. N 12. P. 1089–1097.
2. de Munk J., Goncalves S., Mammoliti R., Heethaar R., Lopes da Silva F. Interaction between different EEG frequency bands and their effect on alpha—fMRI correlation // *Neuroimage*. 2009. Vol. 47. N 1. P. 69–76.
3. Roopun A.K., Kramer M.A., Carrasado L.M., Kaiser M., Davies C.H., Traub R.D., Koppel N.J., Whittington M.A. Temporal interaction between cortical rhythms // *Front. Neurosci*. 2008. Vol. 2. N 2. P. 145–154.
4. Rodriguez-Martinez E. I., Barriga-Paulino C. I., Rojas-Benjumea M. A., Gomez C.M. Co-maturation of theta and low—beta rhythms during child development // *Brain Topogr*. 2015. Vol. 28. N 2. P. 250–260.
5. Wang J., Fang Y., Wang X., Yang H., Yu X., Wang H. Enhanced gamma activity and cross-frequency interaction of resting-state electroencephalographic oscillations in patients with Alzheimer's disease // *Front. Aging Neurosci*. 2017. Vol. 9: 243.
6. Яковенко И.А., Петренко Н.Е., Черемушкин Е.А., Козлов М.К. Взаимодействие ритмов ЭЭГ при установке на лицевую экспрессию // *Рос. физиол. журн. им. И.М. Сеченова*. 2017. Т. 103. № 7. С. 825–834.
7. Niculin V., Nolte G., Curio G. Cross-frequency decomposition. A novel technique for studying interactions between neuronal oscillation with different frequencies // *Clin. Neurophysiol*. 2012. Vol. 123. N 7. P. 1353–1360.
8. Amiri M., Frauscher B., Gotman J. Phase-amplitude coupling is elevated in deep sleep and in the onset of focal epileptic seizures // *Front. Hum. Neurosci*. 2016. Vol. 10: 387.
9. Ladenbauer J., Ladenbauer J., Külzow N., de Boer R., Avramova E., Grittner U., Flöel A. Promoting sleep oscillations and their functional coupling by transcranial stimulation enhances memory consolidation in mild cognitive impairment // *J. Neurosci*. 2017. Vol. 37. N 30. P. 7111–7124.
10. Li D., Ni M., Dun S. Phase-amplitude coupling in human scalp EEG during NREM sleep // 8th International Conference on BioMedical Engineering and Informatics (BMEI Shenyang, China, 14–16 October 2015), IEEE Catalog Number. 2015. P. 219–223.
11. Takeuchi S., Mima T., Murai R., Shimazu H., Isomura Y., Tsujimoto T. Gamma oscillations and their cross-frequency coupling in the primate hippocampus during sleep // *Sleep*. 2015. Vol. 38. N 7. P. 1085–1091.
12. Scheffzuk C., Kukushka V.I., Vyssotski A.L., Draguhn A., Tort A.B.L., Brankač J. Selective coupling between theta phase and neocortical fast gamma oscillations during REM-sleep in mice // *PLoS ONE*. 2011. Vol. 6. N 12. e28489.
13. Яковенко И.А., Петренко Н.Е., Черемушкин Е.А., Дорохов В.Б. Функциональная роль связи бета-ритма с медленными ритмами у студентов с нарушениями сна при формировании установки на лицевую экспрессию // *Рос. физиол. журн. им. И.М. Сеченова*. 2018. Т. 104. № 10. С. 1238–1249.
14. Klimesch W. EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: a review and analysis // *Brain Res. Rev*. 1999. Vol. 29. N 2–3. P. 169–195.
15. Iber C., Ancoli-Israel S., Chesson A., Quan S. The AASM manual for the scoring of sleep and associated events; rules, terminology and technical specifications. Westchester: American Academy of Sleep Medicine, 2007. 59 pp.
16. Bibbig A., Middleton S., Racca C., Gillies M.J., Garner H., LeBeau F.E.N., Davies C.H., Whittington M.A. Beta rhythms (15–20) generated by nonreciprocal communication in hippocampus // *J. Neurophysiol*. 2007. Vol. 97. N 4. P. 2812–2823.
17. Linas R., Grace A., Yarom Y. In vitro neurons in mammalian cortical layer 4 exhibit intrinsic oscillatory activity in the 10- to 50-Hz frequency range // *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A*. 1991. Vol. 88. N 3. P. 897–901.
18. Yeh Ch.-H., Shi W. Identifying phase-amplitude coupling in cyclic alternating pattern using masking signals // *Sci. Rep*. 2018. Vol. 8. N 1. P. 2649–2657.

Поступила в редакцию 31.01.2019 г.
После доработки 08.04.2019 г.
Принята в печать 16.04.2019 г.

RESEARCH ARTICLE

THE STUDY OF COUPLING RHYTHMIC COMPONENTS OF THE EEG DURING THE FIRST STAGE OF DAY SLEEP

I.A. Yakovenko*, D.E. Shumov, N.E. Petrenko, M.K. Kozlov, V.B. Dorokhov

*Neurobiology of Sleep and Wake Lab, Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology, Russian Academy of Sciences, Butlerova str. 5a, Moscow, 117485, Russia***e-mail: irinayakovenko@mail.ru*

The coupling of EEG rhythms is an important indicator of the functional state of the human brain. Currently, there are three theories explaining such interaction: a) communication of neural populations; b) neural interaction; c) interaction of generators of the studied frequencies. It is known that theta-rhythm is associated with the functioning of the cortico-hippocampal system, and alpha-thalamo-cortical, and beta-can be included in the work of both cortico-subcortical systems. The presented work can clarify the features of the interaction of the above-described cortical-subcortical systems. There are a number of works devoted to the study of the coupling of EEG rhythms in various types of mental activity. In recent years, there has been interest in the connection of rhythms at different stages of sleep. The task of our work was to study the interaction of theta-, alpha- and beta-rhythms of EEG in the first stage of sleep. The study involved 22 subjects aged 18 to 22 years. Multichannel EEG was recorded during the daytime sleep of the experiment participants. EEG segments with a well-defined theta-rhythm were selected for processing, since it is «dominant» at the first stage of sleep. Then the range filtering of the EEG signal was carried out. The following rhythms were distinguished: theta-rhythm (4–7 Hz), alpha-rhythm (8–13 Hz), beta-1- (14–19 Hz) and beta-2-rhythm (20–25 Hz). After that, for each range at each second, the average amplitude was calculated as the square root of the EEG signal dispersion. Pearson correlation coefficient was used as a measure to evaluate the interaction of EEG rhythms. As a result, it was found that the first stage of sleep was characterized by: a) lack of connections of theta-rhythm with other rhythms; b) the presence of links alpha-beta-1-, alpha-beta-2- and beta-1-beta-2-rhythms, c) the increase of the amplitude of the theta-rhythm and d) decrease the amplitude of alpha- and beta-rhythms. As noted above, theta-rhythm is associated with the functioning of the cortico-hippocampal system, and alpha – thalamo-cortical. In our work two coexisting types of functioning of these systems are shown: «independent» cortical-hippocampal circle and connected with other rhythms, in particular with beta-rhythm, thalamo-cortical. Probably, this heterogeneity is a condition that the first stage of sleep can be unstable. An increase in the amplitude of the theta-rhythm at the first stage of sleep in relation to the state of quiet wakefulness is shown. This is traditionally associated with an increase in the ascending effects of the limbic structures of the brain. The amplitudes of alpha- and beta-rhythms at first stage of sleep were significantly reduced, which indicates a weakening of the influence of prefrontal cortex on the centers of the posterior hypothalamus. Based on this, it can be assumed that the onset of first stage of sleep can be provided by the heterogeneous nature of the coupling of rhythms, and accordingly, the different functioning of the cortico-hippocampal and thalamo-cortical systems.

Keywords: *coupling the EEG rhythms, alpha-rhythm, theta-rhythm, beta-rhythm, mean amplitude rhythms EEG, thalamo-cortical system, cortico-hippocampal system, first sleep stage*

Сведения об авторах

Яковенко Ирина Анатольевна — канд. биол. наук, ст. науч. сотр. Института высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН. Тел.: 8-495-334-92-05; e-mail: irinayakovenko@mail.ru

Шумов Дмитрий Ефимович — инженер Института высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН. Тел.: 8-495-334-92-05; e-mail: dmitry-shumov@yandex.ru

Петренко Надежда Евгеньевна — канд. биол. наук, науч. сотр. Института высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН. Тел.: 8-495-334-92-05; e-mail: xhthon@yandex.ru

Козлов Михаил Кириллович — вед. инженер Института высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН. Тел.: 8-495-334-92-05; e-mail: mkkozlov@yandex.ru

Дорохов Владимир Борисович — докт. биол. наук., зав. лабораторией нейробиологии сна и бодрствования Института высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН. Тел.: 8-495-334-92-05; e-mail: vbdorokhov@mail.ru