

УДК 612.821.6

МЕЖПОЛУШАРНЫЕ РАЗЛИЧИЯ СВЯЗЕЙ МЕЖДУ РИТМАМИ ЭЭГ ПРИ ПОЛНОМ И НЕПОЛНОМ ПРОБУЖДЕНИИ

© 2024 г. И. А. Яковенко*, Н. Е. Петренко**, Е. А. Черемушкин***,
Е. О. Гандина****, В. Б. Дорохов*****

*ФБГУН Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН;
117485, г. Москва, ул. Бутлерова, д. 5А, Россия.*

**Старший научный сотрудник, кандидат биологических наук.*

E-mail: irinayakovenko@mail.ru

***Научный сотрудник, кандидат биологических наук.*

E-mail: ivnd@mail.ru

****Старший научный сотрудник, кандидат биологических наук.*

E-mail: ivnd@mail.ru

*****Младший научный сотрудник.*

E-mail: gandina.e@ihna.ru

******Главный научный сотрудник, заведующий лабораторией.*

E-mail: vbdorokhov@mail.ru

Поступила 18.08.2024

Аннотация. В теории А.Р. Лурия описан структурно-функциональный блок, регулирующий цикл “сон–бодрствование”, который участвует в процессе пробуждения. Тем не менее особенности межполушарной асимметрии при пробуждении из разных фаз сна остаются недостаточно изученными. Практически отсутствуют работы по взаимодействию ритмов ЭЭГ при восстановлении деятельности сразу после пробуждения. Цель исследования заключалась в выявлении различий в работе полушарий мозга (в рамках теории А.Р. Лурия) при пробуждении с разной эффективностью восстановления психомоторной деятельности. Предполагалось выявить связанность одновременно функционирующих структур мозга в 1 блоке по А.Р. Лурия. Для анализа использовали данные 15 из 83 участников, прошедших всю процедуру исследования. Параллельно с выполнением бимануального психомоторного теста регистрировали многоканальную ЭЭГ. Оценка мощностных характеристик ЭЭГ проводили на основе “материнского” комплексного Morlet-вейвлета. Мерой амплитудно-амплитудного взаимодействия ритмов ЭЭГ служил коэффициент корреляции Кендалла. Полное пробуждение характеризуется наличием асимметричных связей ритмов ЭЭГ в обоих полушариях. Неполное пробуждение сопровождается связями ритмов только в левом полушарии. При полном пробуждении асимметрия связей ритмов ЭЭГ наблюдается в лобных и височных областях левого полушария и только в лобных — правого. При неполном — практически во всех областях левого полушария. Выполнение психомоторного теста характеризуется различной эффективностью восстановления деятельности после сна, и разные уровни эффективности характеризуются различиями в функционировании полушарий по показателю связей ритмов ЭЭГ. Выявлены связи ритмов ЭЭГ, на основе которых высказано предположение о сопряженной работе таламо-кортикальной и кортико-гиппокампальной систем в пределах 1 блока по А.Р. Лурия. Оба вида пробуждения характеризовались участием всех структурно-функциональных блоков по А.Р. Лурия, различающихся в полушариях в зависимости от вида пробуждения. Полное и неполное пробуждение характеризуется не только различным набором асимметричных связей ритмов ЭЭГ в полушариях, но и их локализацией.

Ключевые слова: межполушарная асимметрия, взаимодействие ритмов ЭЭГ, психомоторный тест, пробуждение.

DOI: 10.31857/S0205959224060078

Выполнение монотонной работы (психомоторный тест), приводящей к засыпанию и последующему пробуждению, характеризуется различной эффективностью восстановления деятельности, которое, в свою очередь, сопровождается различиями в функционировании полушарий по показателю связей ритмов ЭЭГ. В своем основополагающем труде А.Р. Лурия [3] выделил три структурно-функциональных блока мозга, совместная динамичная работа которых обеспечивает отдельно взятую психическую функцию. «Каждый из трех функциональных блоков мозга представлен симметрично в левом и правом полушариях мозга, которые специфичны по ведущей роли в различных познавательных процессах». В частности, 1 блок осуществляет «энергетическое» обеспечение оптимального уровня психической деятельности, регулирует уровень активации и, что важно для нашей работы, регулирует цикл «сон—бодрствование».

Состояния бодрствования (различные виды психической деятельности) и сна сопровождаются разными проявлениями межполушарной асимметрии по различным показателям мозговой активности. Она проявляется как на структурном уровне (анатомия мозга), так и функциональном (вклада каждого полушария в любую психическую функцию). Наибольший интерес вызывали различные виды психической деятельности и, соответственно, сопровождающие их особенности межполушарной асимметрии. Наш интерес был сконцентрирован на асимметрии во сне и при пробуждении, поэтому далее будут приведены работы, касающиеся изучения данных состояний. В работе [11] говорится о том, что на первой стадии сна отмечалось преобладание спектров мощности ритмов ЭЭГ в правом полушарии в изучаемых областях коры больших полушарий. Авторы, опираясь на данные [9], предполагают, что правое полушарие во сне более бдительно. Изучали амплитуду сонных веретен второй стадии сна [8]. Была обнаружена асимметрия амплитуды сонных веретен. Амплитуда орбитофронтальных, височно-затылочных и теменных веретен преобладала в левом полушарии, а амплитуда префронтальных веретен — в правом полушарии. Исследования [25] показали, что на стадии медленного сна у человека асимметрия не охватывает все полушарие, а является пространственно ограниченной. Авторы полагают, что такой вид асимметрии связан с защитным механизмом, связанным с потенциальной опасностью в незнакомой для сна обстановке.

Несколько менее изучен процесс пробуждения. В работах [15; 28] делается предположение о наличии сознания во сне. Такой вид сознания,

безусловно, будет отличаться от сознания в бодрствовании. При пробуждении происходит переход сознания с одного уровня во сне к другому при деятельности в бодрствовании. Остается не до конца выясненным вопрос о том, что влияет на процесс пробуждения? Каковы нейрофизиологические основы данного явления? Какие процессы влияют на эффективность деятельности после пробуждения?

Было показано, что в течение нескольких минут после пробуждения наблюдается повышенная сонливость и снижение работоспособности по сравнению с деятельностью в дневное время. Это явление известно как инерция сна. В этот период происходит снижение связи между сетями мозга на протяжении 5 мин после пробуждения. Установлена корреляция между мощностью дельта-ритма и функциональной связью сетей мозга [29]. Пробуждение из второй стадии сна по данным регистрации РЕТ показало, что быстрее всего восстанавливается кровоток в стволе мозга и таламусе по сравнению с другими областями мозга. В последующие 15 мин увеличение показателей мозгового кровотока было отмечено во фронтальных отделах коры. Авторы предполагают, что таким образом происходит реактивация областей, которая лежит в основе восстановления сознания [6]. Исследование межполушарной асимметрии при пробуждении из разных фаз сна показало преобладание левого полушария после пробуждения из NREM-сна и правого — после REM-сна по качеству выполнения задания правой или левой рукой [7].

Для исследования функциональной асимметрии используют разные методы. В настоящее время наблюдается все больше попыток оценить не единичные параметры, а более сложные, оценивающие функциональные связи структур или систем мозга. В частности, в работе В. Wang с соавторами [27] говорится о том, что структурная и функциональная взаимосвязь внутри каждого полушария определяет межполушарную сеть или коннектом. Одним из методов, позволяющих оценить взаимодействие мозговых структур, являются кроссчастотные связи ритмов ЭЭГ. Авторы [17] считают, что «связь ритмов ЭЭГ функционально важна для обработки информации в коре головного мозга, потенциально служа механизмом интеграции функционально значимых областей мозга». Связи ритмов ЭЭГ могут характеризовать различные когнитивные процессы, такие как внимание [19], восприятие музыки, понимание речи [23], сенсомоторная интеграция, контроль внимания [16] и т.д. В работе [21] говорится о том, что сочетание медленных и быстрых волн свидетельствует об интеграции

мотивационных и когнитивных процессов. При изучении развития нервной системы [22] также использован метод кроссчастотного взаимодействия.

Как мы уже писали, наш интерес был сфокусирован в основном на 1 блоке. Этот блок включает в себя большое число структур, таких как таламус, гиппокамп, медиобазальная кора лобных и височных долей и многие другие. Динамичную работу этих структур косвенно можно видеть, используя метод регистрации ЭЭГ. Описана привязка ритмов ЭЭГ к функционированию корково-подкорковых образований мозга [4; 13; 25]. Используемый нами метод cross-frequency coupling позволяет рассматривать не просто одновременное функционирование каких-либо структур мозга, а их совместную работу. Именно связи образований внутри блока в полушариях могут несколько дополнить существующее описание 1 блока по А.Р. Лурия.

Целью нашей работы являлось выявление различий в работе полушарий мозга (в рамках теории А.Р. Лурия) при пробуждении с разной эффективностью восстановления психомоторной деятельности.

Задача исследования — оценить амплитудно-амплитудное взаимодействие ритмов ЭЭГ в левом и правом полушариях мозга при частичном и полном пробуждении.

МЕТОДИКА

Проведенная работа соответствовала этическим нормам Хельсинкской декларации Всемирной медицинской ассоциации “Этические принципы проведения научных медицинских исследований с участием человека” с поправками 2000 г. Исследование одобрено этической комиссией ИВНД и НФ РАН (протокол № 2 от 3 июня 2019 г.). В эксперименте приняли участие 83 добровольца. В обработку пошли данные 15 практически здоровых испытуемых, правшей, студентов, 14 женщин и 1 мужчина в возрасте от 18 до 22 лет ввиду определенных следующих критериев отбора материала: наличие второй стадии дневного сна, начало нажатия правой рукой, наличие у одного и того же испытуемого ситуации полного и неполного восстановления выполнения психомоторной деятельности.

У испытуемых в анамнезе отсутствовали неврологические, психические заболевания и расстройства сна. Они не должны были пить алкоголь в течение дня, накануне исследования. В день эксперимента им было рекомендовано воздержаться от употребления кофе, крепкого чая, шоколада

и энергетических напитков. Все участники исследования не получали денежного вознаграждения.

Участники заполнили анкеты “Дневник сна” [20], Каролинскую шкалу сонливости (KSS) [18] и общего состояния (САН) [2] перед началом эксперимента. Опыт начинался в интервале с 13.00 до 14.00 и длился около 1.5 ч. Во время записи испытуемый лежал на кушетке с закрытыми глазами в затемненном, звукоизолированном и вентилируемом помещении. Экспериментальной моделью служил бимануальный психомоторный тест [12]. Испытуемый должен был нажимать на кнопки большими пальцами правой и левой руки по 10 раз, чередуя серии нажатий. Нажатия на кнопки продолжались до засыпания. При самопроизвольном пробуждении он возобновлял выполнение теста.

Параллельно с проведением теста регистрировали ЭЭГ хлорсеребряными электродами (18 отведений в соответствии со схемой 10–20%, референтные электроды располагались на мастоидах, сопротивление — до 5 КОм, частота дискретизации 500 Гц, полоса пропускания усилителя — 0.5–40 Гц), а также электроокулограммы и механограммы нажатий на кнопки. Анализ ЭЭГ проводился для двух ситуаций — частичного (неполного) и полного выполнения заданий теста. Частичным считалось выполнение, при котором испытуемый нажимал на кнопку правой, а затем левой рукой от 7 до 9 раз; полным — 10 раз. Анализировались отрезки записи после эпизода второй стадии сна не менее 30 с при самопроизвольном пробуждении. Оценка принадлежности ЭЭГ к данной стадии проводилась экспертами по критериям AASM. Длина эпизодов — 40 с (по 20 с до и после начала нажатий). В текущий анализ брали отрезки по 20 с с момента нажатия на кнопку правой рукой. При анализе ЭЭГ разбивали исследуемую эпоху на 2-секундные отрезки. Число пробуждений у обследованных 15 испытуемых варьировалось от 2 до 8.

Оценку амплитудных характеристик биоэлектрической активности коры проводили с помощью непрерывного вейвлет-преобразования на основе “материнского” комплексного Morlet-вейвлета (Matlab 78.01). От полученных комплексных коэффициентов вейвлет-преобразования (КВП) переходили к их модулю (амплитуде) (мКВП). Карты распределения значений модуля коэффициента вейвлет-преобразования строили в полосе 0.5–40 Гц с шагом 0.5 Гц и разрешением по времени 0.01 с. Исследовали дельта (1–3 Гц), тета (4–7), альфа-1 (8–10), альфа-2 (11–13), бета (14–20) и гамма (21–40) спектральные диапазоны. Для анализа восстановления деятельности в обеих ситуациях использовались усредненные значения мКВП

первых 6 с начала деятельности (т.е. первых 3–2-секундных интервалов) как для отдельных симметричных отведений ЭЭГ левого и правого полушария, так и суммарно для отведений левого и правого полушарий. Мерой взаимодействия ритмов ЭЭГ выбирали коэффициент парной корреляции Кендалла (КК). Например, для определения меры взаимодействия дельта- и альфа-1-ритмов брали вычисленные мКВП дельта- и альфа-1-спектральных диапазонов ЭЭГ для каждого испытуемого ($n = 15$), и далее между ними вычисляли КК. Эту операцию проводили для всех пар ритмов. При оценке связей ритмов по полушариям в целом симметричными считались связи (т.е. значимые ($p < 0,05$) КК между ритмами), присутствующие в обоих полушариях, а асимметричными — только в одном. Например, если связь дельта—альфа-1 была статистически значимой только в левом полушарии, она считалась асимметричной. При оценке по областям симметрично расположенных отведений ЭЭГ симметричными с точки зрения связей ритмов считались такие пары областей, в которых набор статистически значимых ($p < 0,05$) пар связей ритмов был одинаковым. Если то или иное число значимых связей наблюдалось только в одной области отведения из пары симметричных по расположению (например, в F7 — “дельта—тета” была, а в F8 — нет; или, с другой стороны, в F8 — “альфа-1—бета” была значимой, а в F7 — нет), то она считалась асимметричной. Асимметричные и симметричные отношения между ритмами (по существу, те или иные различия или полное сходство в наборах статистически значимых

связей (корреляций) между ритмами, симметрично расположенных в левом и правом полушариях пар отведений ЭЭГ) отображались на картах-схемах.

Статистическая обработка осуществлялась с помощью пакета программ SPSS, v. 12.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Полное и неполное пробуждение по исследуемым параметрам в полушариях существенно различается. Полное пробуждение характеризуется наличием достоверных асимметричных связей ритмов ЭЭГ в обоих полушариях. В левом полушарии мы отмечаем 10 таких связей, а в правом — 4 (табл. 1). При этом неполное пробуждение сопровождается связями ритмов только в левом полушарии (число связей — 15) (табл. 2). Уточним, что под связями далее понимаются асимметричные (наблюдаемые в одном полушарии) связи между полушариями, а число асимметричных связей — сумма всех асимметричных связей по всем диапазонам.

Получен интересный факт о связях дельта-ритма: при обоих видах пробуждения у него обширные связи, но только в левом полушарии. Полное пробуждение характеризуется несколько меньшим количеством асимметричных связей дельта-ритма в отличие от неполного.

Более разнообразные межполушарные различия касаются связей тета- и альфа-ритмов. В левом полушарии тета-ритм связан с дельта- и альфа-ритмами, а в правом — с альфа-1 при полном

Табл. 1. Связи ритмов ЭЭГ при полном пробуждении суммарно по отведениям левого и правого полушарий

	Дельта	Тета	Альфа-1	Альфа-2	Бета	Гамма	Суммарно
Дельта							
Лп		+	+	+	+	+	5
Пп							
Тета							
Лп			+	+			2
Пп			+				1
Альфа-1							
Лп						++	2
Пп					++		2
Альфа-2							
Лп						+	1
Пп						+	
Бета							
Лп							
Пп							
Гамма							
Суммарно		1 лп	2 лп + 1 пп	2 лп	1 лп + 2 пп	4 лп + 1 пп	

Примечание. лп — левое полушарие (светло-серые ячейки); пп — правое полушарие (темно-серые ячейки). Значки “+” — значимые связи ритмов ЭЭГ.

Табл. 2. Связи ритмов ЭЭГ при неполном пробуждении суммарно по отведениям левого и правого полушарий.

	Дельта	Тета	Альфа-1	Альфа-2	Бета	Гамма	Суммарно
Дельта							
Лп			+	+	+++	++	7
Пп							
Тета							
Лп			+		+	++	4
Пп							
Альфа-1							
Лп					+	++	3
Пп							
Альфа-2							
Лп						+	1
Пп							
Бета							
Лп							
Пп							
Гамма							
Суммарно			2	1	4	7	

Примечание. Обозначения, как на табл. 1.

пробуждении. При неполном — к связи тета-ритма с альфа-1 добавляются его связи с бета- и гамма-ритмами также в левом полушарии.

Полное пробуждение характеризуется наличием корреляционных связей альфа-1-ритма с дельта-, тета- и гамма-ритмами в левом полушарии, а в правом — с тета- и бета-ритмами. Альфа-2 связан с дельта-, тета- и гамма-ритмами в левом полушарии, а в правом — только с гамма-ритмом. Неполное пробуждение демонстрирует связи обоих поддиапазонов альфа-ритма с бета- и гамма-ритмами в левом полушарии.

Виды пробуждения различаются также и числом связей гамма-ритма с более быстрыми ритмами. При неполном пробуждении в левом полушарии отмечается больше корреляционных связей, чем при полном (отсутствуют его связи с тета-ритмом).

Таким образом, полное и неполное пробуждение отличается структурой асимметричных связей ритмов ЭЭГ. Полное пробуждение сопровождается наличием асимметричных связей в обоих полушариях, а неполное — только левого полушария.

Рассмотрим местоположение отмеченных случаев как асимметрии, так и полной симметрии связей ритмов ЭЭГ по областям коры больших полушарий. При полном пробуждении асимметрия связей ритмов ЭЭГ наблюдается в лобных и височных областях левого полушария (отведения F7, T3, T5) и только в лобных (F4, F8) — правого (рис. 1). При неполном пробуждении она наблюдается только в левом полушарии (отведения F7, C3, T3, T5, O1)

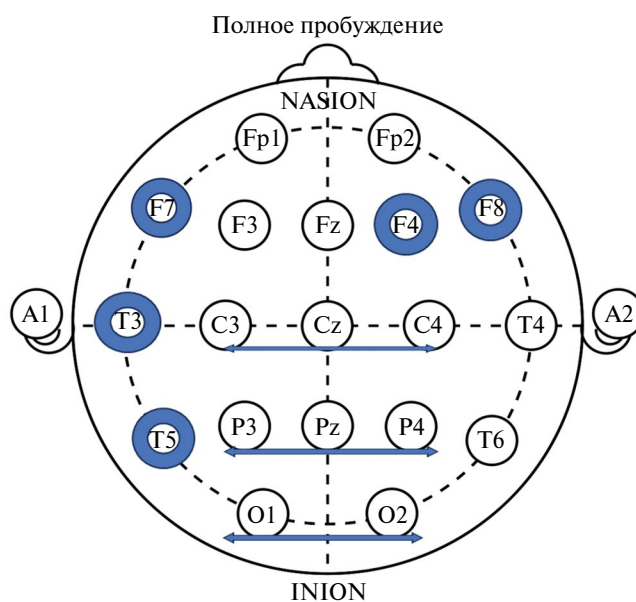


Рис. 1. Карта-схема распределения случаев асимметрии и симметрии связей ритмов ЭЭГ при полном пробуждении
Примечание. Обведенные кружки — области отведения ЭЭГ с различающимся набором связей ритмов по отношению к симметричным им областям (асимметрия связей); линии со стрелками указывают на пары симметричных областей с совпадением набора связей между ритмами (симметрия связей). Обозначены названия отведений ЭЭГ.

(рис. 2). При полном пробуждении одинаковый набор связей ритмов отмечен в центральных, теменных и затылочных областях (C3—C4, P3—P4 и O1—O2) (см. рис. 1), а при неполном — в лобных и теменных (F3—F4 и P3—P4) (см. рис. 2).

Рассмотрим, какие связи ритмов ЭЭГ характеризуют асимметрию и симметрию при полном

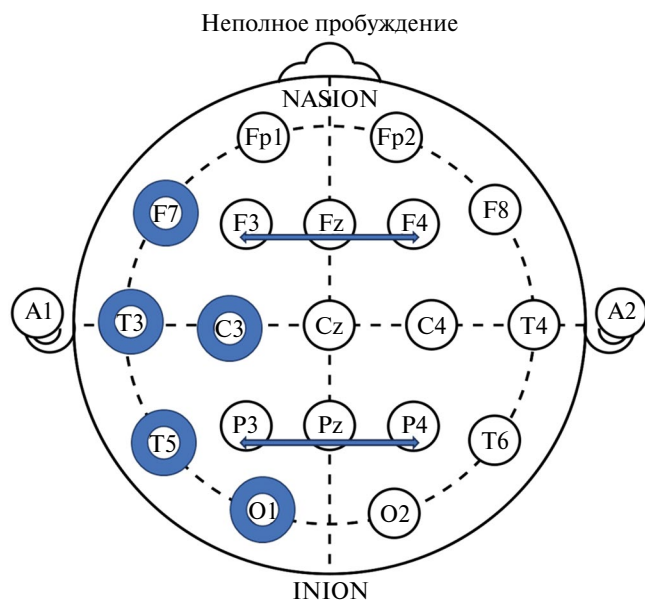


Рис. 2. Карта-схема распределения случаев асимметрии и симметрии связей ритмов ЭЭГ при неполном пробуждении
* Обозначения, как на рис. 1.

(табл. 3) и неполном пробуждении (табл. 4) в отдельных отведениях ЭЭГ.

При неполном пробуждении в отличие от полного при анализе отдельных отведений, так же, как и для показателей связей ритмов ЭЭГ по полушариям в целом, асимметричные связи выявлены только в левом полушарии. Отметим высокую представленность корреляционных связей дельта-ритма среди выявленных значимых корреляций между ритмами при анализе по областям отведения.

Табл. 3. Асимметричные и симметричные связи ритмов ЭЭГ при полном пробуждении по областям коры больших полушарий

Отведения	Асимметрия	Отведения	Симметрия
	Связи ритмов ЭЭГ		Связи ритмов ЭЭГ
F4	Тета—альфа-1, альфа-1—бета, альфа-2—гамма	C3 = C4	Дельта—тета, дельта—бета, дельта—гамма, тета—альфа-1, тета—альфа-2, тета—бета, тета—гамма, альфа-1—альфа-2, альфа-1—бета, альфа-1—гамма, альфа-2—бета, альфа-2—гамма, бета—гамма
F7	Дельта—тета, дельта—бета, дельта—гамма	P3 = P4	Дельта—тета, дельта—бета, дельта—гамма, тета—альфа-1, тета—альфа-2, тета—бета, тета—гамма, альфа-1—альфа-2, альфа-1—бета, альфа-1—гамма, альфа-2—бета, альфа-2—гамма, бета—гамма
F8	Альфа-1—бета	O1 = O2	Дельта—тета, дельта—бета, дельта—гамма, тета—тета, тета—гамма, альфа-1—альфа-2, альфа-1—бета, альфа-2—бета, бета—гамма
T3	Альфа-1—гамма, альфа-2—гамма		
T5	Дельта—альфа-1, дельта—альфа-2, тета—альфа-1, тета—альфа-2, альфа-1—гамма		

Примечание. Можно заметить, что при полном пробуждении в левом полушарии наблюдаются связи дельта-ритма, чего нет в правом полушарии.

Если посмотреть, в каких симметричных областях отведения ЭЭГ наблюдается практически одинаковый набор связей между ритмами, то можно заметить, что при полном пробуждении эти области располагаются в направлении от центра к затылку, тогда как при неполном — это лобные и теменные отведения.

Таким образом, полное и неполное пробуждение различается как наборами корреляционных связей в отведениях ЭЭГ, так и их локализацией.

ОБСУЖДЕНИЕ

Использование показателя амплитудно-амплитудного взаимодействия ритмов ЭЭГ оказалось информативным для определения наличного функционального состояния испытуемых, сопровождающегося различной эффективностью выполнения задания.

Полное пробуждение сопровождается большим числом асимметричных связей в левом полушарии, что хорошо объясняется началом работы правой рукой. Но и правое полушарие также имеет определенное количество асимметричных связей. Можно предположить, что в правом полушарии в это время происходит подготовка (планирование) к нажатию левой рукой. При неполном пробуждении асимметричные связи ритмов в правом полушарии отсутствуют, т.е. нет связей ритмов, отличающихся от таковых в правом полушарии. Это может свидетельствовать об отсутствии намерения продолжать деятельность.

Таблица 4. Асимметричные и симметричные связи ритмов ЭЭГ при неполном пробуждении

Отведения	Асимметрия		Отведения	Симметрия	
	Связи ритмов ЭЭГ			Связи ритмов ЭЭГ	
C3	Тета—гамма		F3 = F4	Дельта—тета, дельта—бета, тета—альфа-1, тета—альфа-2, альфа-1—альфа-2, альфа-1—бета, альфа-2—бета, бета—гамма	
F7	Дельта—бета, тета—альфа-1, тета—альфа-2, альфа—бета		P3 = P4	Дельта—тета, тета—альфа-1, тета—альфа-2, тета—бета, альфа-1—альфа-2, альфа-1—бета, альфа-2—бета, альфа-2—гамма, бета—гамма	
T3	Дельта—альфа-1, альфа-1—гамма, альфа-2—гамма				
T5	Дельта—альфа-2, дельта—бета, дельта—гамма, тета—гамма, альфа-1—гамма				
O1	Дельта—бета, дельта—гамма				

Рассмотрим, какие различия по связям ритмов ЭЭГ наблюдались при разных видах пробуждения.

Связи дельта-ритма. Получен интересный факт: дельта-ритм имеет большое число связей только в левом полушарии при обоих видах пробуждения. Здесь, по-видимому, преобладали процессы, связанные с увеличением влияний ретикулярной формации среднего мозга и таламуса. Но при этом наблюдаются некоторые различия между видами пробуждения. При полном пробуждении отмечены связи дельта-ритма с остальными изучаемыми ритмами, и их несколько меньше (5 связей), чем при неполном пробуждении (7 связей). Традиционно дельта-ритм связывают с работой таламо-кортикальной системы [13]. Посмотрим, как эта корково-подкорковая система функционирует при разных видах пробуждения. По сравнению с полным пробуждением при неполном отсутствует связь с тета-ритмом и увеличивается количество связей, в которые вовлечены бета- и гамма-ритмы. Можно сделать некоторые предположения о природе дельта-ритма при разных видах пробуждения. По-видимому, функциональные состояния испытуемых при разных видах пробуждения различаются. Если мы наблюдаем полное пробуждение, то оно по своим нейрофизиологическим основам должно приближаться к полноценной деятельности при бодрствовании. Тогда как неполное пробуждение характеризуется несколько сниженным уровнем сознания, поскольку человек после такого пробуждения снова засыпает. Вероятно, при неполном пробуждении в функционировании мозга могут наблюдаться элементы как бодрствования, так и сна. В частности, это может быть связано с инерцией сна [26]. В пользу этого свидетельствуют и связи дельта-ритма. Дельта-ритм характерен для состояния как сна [24], так и для бодрствования [14]. Вероятно, дельта-ритм при разных видах пробуждения имеет разную природу. При полном пробуждении

дельта-ритм может отражать интеллектуальную нагрузку, при неполном скорее связан с последующим засыпанием. Отсутствие его связи с тета-ритмом, а соответственно с кортико-гиппокампальной системой и, следовательно, памятью [28] и наличие связи с бета- и гамма-ритмами, что, вероятно, может свидетельствовать о кратковременной активации таламо-кортикальной системы, не способны длительно “удерживать” мозг в бодрствующем состоянии при неполном пробуждении.

Связи тета-ритма. Тета-ритм связывают с работой кортико-гиппокампальной системы, которая участвует в процессах памяти [28]. Полное пробуждение характеризуется связями тета-ритма с обоими поддиапазонами альфа-ритма в обоих полушариях. Вероятно, в этом случае корково-подкорковая система объединяется с таламо-кортикальной [4]. Связи двух корково-подкорковых систем в полушариях различаются: в левом полушарии они охватывают весь диапазон альфа-ритма, в правом — только с альфа-1. Связи тета-ритма с обоими поддиапазонами альфа-ритма в левом полушарии предположительно можно рассматривать как состояние, максимально приближенное к полноценному бодрствованию и готовности испытуемого к выполнению задания правой рукой. Правое полушарие пока находится в стадии подготовки к выполнению задания. При неполном пробуждении выявлены связи тета-ритма с альфа-1, бета- и гамма-ритмами в левом полушарии. Связи с быстрыми ритмами ЭЭГ в левом полушарии предположительно могут отражать более сильную активацию кортико-гиппокампальной системы, но, вероятно, менее продолжительную, поскольку испытуемые не полностью выполняют задание и засыпают.

Связи ритмов альфа-диапазона. Асимметричные левосторонние связи альфа-ритма при полном и неполном пробуждении довольно сходны. Такое

сходство, вероятно, объясняется тем, что испытуемые, несмотря на степень пробуждения, выполняют задание. Единственное различие — наличие связей альфа-ритма в правом полушарии при полном пробуждении. Выше было высказано предположение о том, что в данном случае мы наблюдаем процесс планирования нажатия правой рукой. Это в определенной мере согласуется с данными [30] о наличии ритмов альфа-диапазона в затылочной и теменно-затылочной областях коры головного мозга как на этапе планирования движения, так и на этапе его выполнения.

Связи бета-ритма. При полном пробуждении отмечены связи бета-ритма с дельта в левом полушарии и альфа-1 в правом полушарии. Можно предположить активацию таламо-кортикальной системы в обоих полушариях. При неполном пробуждении бета-ритм связан с дельта- и тета-ритмами только в левом полушарии. Возможно, здесь активированы как таламо-кортикальная, так и кортико-гиппокампальная системы. Бета-колебания часто рассматриваются как сенсомоторный ритм, но при этом их связи существенно различаются в зависимости от вида пробуждения. В работе [31] отмечено увеличение бета-мощности в сенсомоторной области в момент подачи сигнала, за которым последовало снижение во время подготовки и выполнения движения.

Представляют интерес **связи гамма-ритма.** Их существенно больше в левом полушарии при неполном пробуждении по сравнению с полным. В работе [1] говорится о том, что гамма-ритм наблюдается в различных структурах мозга. Авторы относят его к функциональным строительным блокам, которые могут принимать участие во многих когнитивных и сенсорных процессах, а также он может быть связан с процессами сознания. S.M. Doesburg с соавторами [10] предполагают, что появление новых осознанных восприятий совпадает с появлением всплеск активации гамма-диапазона, которые повторяются с тета-частотой. Вероятно, связи гамма-ритма с другими, более медленными ритмами свидетельствуют о том, что: а) испытуемые проснулись и в состоянии выполнять поставленную перед ними задачу; б) активирована таламо-кортикальная система (о чем свидетельствуют связи дельта- и альфа-ритмов с гамма) при полном пробуждении, а при неполном пробуждении активирована не только таламо-кортикальная система, но и кортико-гиппокампальная.

Локализация связей ритмов ЭЭГ. Полное пробуждение характеризуется наличием асимметричных связей в обоих полушариях: в левом полушарии они затрагивают лобно-височные отделы коры

больших полушарий, в правом — только лобные. Неполное пробуждение характеризуется наличием асимметричных связей только в левом полушарии. При этом к вышеперечисленным областям добавляются центральные и затылочные отделы.

В работе [5] на модели унимануального психомоторного теста была показана активация альфа-ритма в передневисочной и вентролатеральной префронтальной коре при когнитивном пробуждении. Авторами была выявлена большая мощность альфа-ритма при последующем полноценном выполнении деятельности по сравнению с частичным восстановлением.

Практически сходный набор связей ритмов ЭЭГ при полном пробуждении наблюдался в настоящем исследовании в центральных, теменных и затылочных областях полушарий. При неполном пробуждении — в лобных и теменных. Вероятно, при неполном пробуждении у испытуемых более выражен когнитивный контроль, который необходим для реализации данной деятельности, происходящей на фоне сниженного уровня сознания по сравнению с полным пробуждением.

Ограничения. Ограничением является небольшое количество участников исследования. Также в силу небольшого числа пробуждений из второй стадии дневного сна в используемом нами дизайне обработки мы не проводили внутрисубъектные сравнения анализируемых показателей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как отмечалось выше, 1 блок по А.Р. Лурия включает в себя, в частности, таламус, гиппокамп, медиобазальную кору лобных и височных долей, а также еще ряд структур. Полученные данные подтвердили участие таламуса и гиппокампа по данным ЭЭГ в процессе пробуждения. Были показаны связи ритмов ЭЭГ, на основе которых высказано предположение о сопряженной работе таламо-кортикальной и кортико-гиппокампальной систем, включающих вышеописанные отделы мозга. При этом полное и неполное пробуждение характеризовалось различиями в связях ритмов ЭЭГ этого блока в полушариях мозга.

Учитывая расположение асимметричных связей ЭЭГ в полушариях, можно предположить участие не только 1, но и 2 и 3 блоков по А.Р. Лурия при обоих видах пробуждения. При полном пробуждении в левом полушарии можно предполагать участие всех трех блоков, а в правом — только третьего. При неполном пробуждении участвуют все три блока, но только в левом полушарии.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Данилова Н.Н., Быкова Н.Б., Анисимов Н.В., Пирогов Ю.А., Соколов Е.Н. Гамма-ритм электрической активности мозга человека в сенсорном кодировании // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. 2002. № 3. С. 34–41.
2. Доскин В.А., Лаврентьева Н.А., Мирошников М.П., Шарай В.Б. Тест дифференцированной самооценки функционального состояния // Вопросы психологии. 1973. Т. 19. № 6. С. 141–145.
3. Лурия А.Р. Основы нейропсихологии. М.: Изд-во Московского университета, 1973. 374 с.
4. Манюхина В.О., Томышев А.С., Каледа В.Г., Лебедева И.С. Структурные особенности таламо-кортикальной системы и спектральные характеристики альфа-ритма у психически здоровых людей и больных шизофренией // Физиология человека. 2020. Т. 46. № 6. С. 50–59. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0131164620050082>
5. Черемушкин Е.А., Петренко Н.Е., Дорохов В.Б. Сон и нейрофизиологические корреляты активации сознания при пробуждении // Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. 2021. Т. 121. № 4 (2). С. 14–18. DOI: <https://doi.org/10.17116/jnevro202112104214>
6. Balkin T.J., Braun A.R., Wesensten N.J., Jeffries K., Varga M., Baldwin P., Belenky G., Herscovitch P. The process of awakening: a PET study of regional brain activity patterns mediating the re-establishment of alertness and consciousness // Brain. 2002. V. 125. № 10. P. 2308–2319. DOI: <https://doi.org/10.1093/brain/awf228>
7. Bertini M., Violani C., Zoccolotti P., Antonelli A., Di Stefano L. Right cerebral activation in REM sleep: evidence from a unilateral tactile recognition test // Psychophysiology. 1984. V. 21. № 4. P. 418–423. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1984.tb00219.x>
8. Bódizs R., Gombos F., Ujma P.P., Szakadat S. The hemispheric lateralization of sleep spindles in humans // Sleep Spindles & Cortical Up States. 2017. V. 1. № 1. P. 42–54. DOI: <https://doi.org/10.1556/2059.01.2017.002>
9. Casagrande M., Bertini M. Laterality of sleep onset process: which hemisphere goes to sleep first? // Biol. Psychol. 2008. № 77. P. 76–80. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2007.09.007>
10. Doesburg S.M., Green J.J., McDonald J.J., Ward L.M. Rhythms of consciousness: binocular rivalry reveals large-scale oscillatory network dynamics mediating visual perception // PLoS One. 2009. V. 4. № 7. e6142. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0006142>
11. Doo-Heum P., Chul-Jin S. Asymmetrical electroencephalographic change of human brain during sleep onset period // Psychiatry Investigation. 2017. V. 14. № 6. P. 839–843. DOI: <https://doi.org/10.4306/pi.2017.14.6.839>
12. Dorokhov V.B. Alpha bursts and K-complex: phasic activation pattern during spontaneous recovery of correct psychomotor performance at different stages of drowsiness // Zhurn. Vyssh. Nerv. Deiat. Im. I.P. Pavlova. 2003. V. 53. № 4. P. 503–512.
13. Faber J., Novak M. Thalamo-cortical reverberation in the brain produces alpha and delta rhythms as iterative convergence of fuzzy cognition in an uncertain environment // Neural Network World. 2011. V. 21. № 2. P. 169–192. DOI: <https://doi.org/10.14311/NNW.2011.21.011>
14. Harmony T. The functional significance of delta oscillations in cognitive processing // Front Integr Neurosci. 2013. V. 7. Art. 83. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnint.2013.00083>
15. Horton C.L. Consciousness across sleep and wake: discontinuity and continuity of memory experiences as a reflection of consolidation processes // Front Psychiatry. 2017. V. 8. Art. 159. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpsy.2017.00159>
16. Knyazev G.G., Savostyanov A.N., Bocharov A.V., Tamozhnikov S.S., Kozlova E.A., Leto I.V., Slobodskaya H.R. Cross-Frequency Coupling in Developmental Perspective // Front Hum Neurosci. 2019. V. 13. Art. 158. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00158>
17. Liu C.C., Chien J.H., Kim J.H., Chuang Y.F., Cheng D.T., Anderson W.S., Lenz F.A. Cross-frequency coupling in deep brain structures upon processing the painful sensory inputs // Neuroscience. 2015. V. 10. № 303. P. 412–421. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2015.07.010>
18. Miley A.Å., Kecklund G., Åkerstedt T. Comparing two versions of the Karolinska Sleepiness Scale (KSS) // Sleep and Biological Rhythms. 2016. V. 14. № 3. P. 257–260. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41105-016-0048-8>
19. Morillas-Romero A., Tortella-Feliu M., Bornas X., Putman P. Spontaneous EEG theta/beta ratio and delta–beta coupling in relation to attentional network functioning and self-reported attentional control // Cognitive Affective & Behavioral Neuroscience. 2015. V. 15. № 3. P. 598–606. DOI: <https://doi.org/10.3758/s13415-015-0351-x>
20. Morin C.M. Insomnia, psychological assessment and management. N.Y.: Guilford Press, 1993. 238 p. DOI: <https://doi.org/10.1192/s0007125000075401>
21. Rutherford H.J.V., Guo X.M., Wu J., Graber K.M., Hayes N.J., Pelphrey K.A., Mayes L. Intranasal oxytocin decreases cross-frequency coupling of neural oscillations at rest // Int. Journ. Psychophysiol. 2018. V. 123. P. 143–151. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpsycho.2017.09.017>

22. Saadatmehr B., Edalati M., Routier L., Mahmoudzadeh M., Safaie J., Kongolo G., Ghostine G., Wallois F., Moghimi S. Evolution of cross-frequency coupling between endogenous oscillations over the temporal cortex in very premature neonates // *Cereb. Cortex*. 2022. V. 33. № 2. P. 278–289. DOI: <https://doi.org/10.1093/cercor/bhac067>
23. Samiee S., Vuvan D., Florin E., Albouy P., Peretz I., Baillet S. Cross-frequency brain network dynamics support pitch change detection affiliations expand // *The Journal of Neuroscience*. 2022. V. 42. № 18. P. 3823–3835. DOI: <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0630-21.2022>
24. Steriade M. Grouping of brain rhythms in cortico thalamic systems // *Neuroscience*. 2006. V. 137. № 4. P. 1087–1106. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2005.10.029>
25. Tamaki M., Bang J.W., Watanabe T., Sasaki Y. Night watch in one brain hemisphere during sleep associated with the first-night effect in humans // *Curr. Biol*. 2016. V. 26. № 9. P. 1190–1194. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2016.02.063>
26. Trotti L.M. Waking up is the hardest thing I do all day: Sleep inertia and sleep drunkenness // *Sleep Med. Rev*. 2017. V. 35. P. 76–84. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.smrv.2016.08.005>
27. Wang B., Yang L., Yan W., An W., Xiang J., Li D. Brain asymmetry: a novel perspective on hemispheric network // *Brain Science Advances*. 2023. V. 9. № 2. P. 56–77. DOI: <https://doi.org/10.26599/BSA.2023.9050014>
28. Windt J.M. Consciousness in sleep: How findings from sleep and dream research challenge our understanding of sleep, waking, and consciousness // *Philosophy Compass*. 2020. e12661. P. 1–16. DOI: <https://doi.org/10.1111/phc3.12661>
29. Vallat R., Meunier D., Nicolas A., Ruby P. Hard to wake up? The cerebral correlates of sleep inertia assessed using combined behavioral, EEG and fMRI measures // *Neuroimage*. 2019. V. 184. P. 266–278. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.09.033>
30. Yang L., Leung H., Plank M., Snider J., Poizner H. EEG activity during movement planning encodes upcoming peak speed and acceleration and improves the accuracy in predicting hand kinematics // *IEEE J Biomed Health Inform*. 2015. V. 19. № 1. P. 22–28. DOI: <https://doi.org/10.1109/JBHI.2014.2327635>
31. Zaepffel M., Trachel R., Kilavik B.E., Brochier T. Modulations of EEG Beta Power during Planning and Execution of Grasping Movements // *PLoS One*. 2013. V. 8. № 3. e60060. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0060060>

HEMISPHERIC DIFFERENCES IN THE CONNECTIONS BETWEEN EEG RHYTHMS DURING FULL AND INCOMPLETE AWAKENING

I. A. Yakovenko*, **N. E. Petrenko****, **E. A. Cheremushkin*****,
E. O. Gandina****, **V. B. Dorokhov*******

*Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology of RAS;
117485, Moscow, Butlerova str., 5A, Russia.*

**Senior Researcher, Candidate of Biological Sciences.*

E-mail: irinayakovenko@mail.ru

***Researcher, Candidate of Biological Sciences.*

E-mail: ivnd@mail.ru

****Senior Researcher, Candidate of Biological Sciences.*

E-mail: ivnd@mail.ru

*****Junior Research Assistant.*

E-mail: gandina.e@ihna.ru

******Chief Researcher, Head of the Laboratory.*

E-mail: vbdorokhov@mail.ru

Received 18.08.2024

Abstract. A.R. Luria's theory describes a structural and functional block that regulates the sleep–wake cycle and is involved in the awakening process. However, the features of interhemispheric asymmetry during awakening from different sleep phases remain insufficiently studied. There are practically no works on the EEG rhythms coupling during the restoration of activity immediately after awakening. Identification of differences in the functioning of the cerebral hemispheres (within the framework of A.R. Luria's theory) upon awakening with varying efficiency of restoration of psychomotor activity. Identification of the connectivity of

simultaneously functioning brain structures in 1 block according to A.R. Luria. Data from 15 of 83 participants who completed the entire study procedure were used for the analysis. Multichannel EEG was recorded in parallel with the bimanual psychomotor test. The power characteristics of the EEG were assessed based on the “mother” complex Morlet wavelet. The Kendall correlation coefficient served as a measure of the amplitude-amplitude interaction of EEG rhythms. Complete awakening is characterized by the presence of asymmetrical connections of EEG rhythms in both hemispheres. Incomplete awakening is accompanied by rhythmic connections in the left hemisphere only. The asymmetry of EEG rhythm coupling is observed in the frontal and temporal regions of the left hemisphere and in the frontal regions of the right hemisphere only during complete awakening. With incomplete awakening — in almost all areas of the left hemisphere. The performance of the psychomotor test is characterized by different efficiency of activity recovery after sleep, and different levels of efficiency are characterized by differences in the functioning of the hemispheres according to the EEG rhythm coupling. Connections between EEG rhythms were identified, on the basis of which an assumption was made about the coupled work of the thalamocortical and cortico-hippocampal systems within the 1 block according to A.R. Luria. Both types of awakening were characterized by the participation of all structural and functional blocks according to A.R. Luria, differing in the hemispheres depending on the type of awakening. Complete and incomplete awakenings are characterized not only by a different set of asymmetrical EEG rhythm connections in the hemispheres, but also by their localization.

Keywords: interhemispheric asymmetry, awakening, EEG rhythms coupling, psychomotor test.

REFERENS

1. *Danilova N.N., Bykova N.B., Anisimov N.V., Pirogov Ju.A., Sokolov E.N.* Gamma-ritm jelektricheskoj aktivnosti mozga cheloveka v sensornom kodirovanii. Biomedicinskie tehnologii i radioelektronika. 2002. № 3. P. 34–41. (In Russian)
2. *Doskin V.A., Lavrent'eva N.A., Miroshnikov M.P., Sharaj V.B.* Test differencirovannoj samoocenki funkcional'nogo sostojanija. Voprosy psihologii. 1973. V. 19. № 6. P. 141–145. (In Russian)
3. *Lurija A.R.* Osnovy nejropsihologii. M.: Izdatel'stvo Moskovskogo Universiteta, 1973. 374 p. (In Russian)
4. *Manjuhina V.O., Tomyshev A.S., Kaleda V.G., Lebedeva I.S.* Strukturnye osobennosti talamo-kortikal'noj sistemy i spektral'nye karakteristiki al'fa-ritma u psihicheski zdorovyh ljudej i bol'nyh shizofreniej. Fiziologija cheloveka. 2020. V. 46. № 6. P. 50–59. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0131164620050082> (In Russian)
5. *Cheremushkin E.A., Petrenko N.E., Dorohov V.B.* Son i nejrofiziologicheskie korreljaty aktivacii soznaniya pri probuzhdenii. Zhurnal nevrologii i psihiatrii im. S.S. Korsakova. 2021. V. 121. № 4 (2). P. 14–18. DOI: <https://doi.org/10.17116/jnevro202112104214> (In Russian)
6. *Balkin T.J., Braun A.R., Wesensten N.J., Jeffries K., Varga M., Baldwin P., Belenky G., Herscovitch P.* The process of awakening: a PET study of regional brain activity patterns mediating the re-establishment of alertness and consciousness. Brain. 2002. V. 125. № 10. P. 2308–2319. DOI: <https://doi.org/10.1093/brain/awf228>
7. *Bertini M., Violani C., Zoccolotti P., Antonelli A., Di Stefano L.* Right cerebral activation in REM sleep: evidence from a unilateral tactile recognition test. Psychophysiology. 1984. V. 21. № 4. P. 418–423. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1984.tb00219.x>
8. *Bódizs R., Gombos F., Ujma P.P., Szakadat S.* The hemispheric lateralization of sleep spindles in humans. Sleep Spindles & Cortical Up States. 2017. V. 1. № 1. P. 42–54. DOI: <https://doi.org/10.1556/2059.01.2017.002>
9. *Casagrande M., Bertini M.* Laterality of sleep onset process: which hemisphere goes to sleep first? Biol. Psychol. 2008. № 77. P. 76–80. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2007.09.007>
10. *Doesburg S.M., Green J.J., McDonald J.J., Ward L.M.* Rhythms of consciousness: binocular rivalry reveals large-scale oscillatory network dynamics mediating visual perception. PLoS One. 2009. V. 4. № 7. e6142. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0006142>
11. *Doo-Heum P., Chul-Jin S.* Asymmetrical electroencephalographic change of human brain during sleep onset period. Psychiatry Investigation. 2017. V. 14. № 6. P. 839–843. DOI: <https://doi.org/10.4306/pi.2017.14.6.839>
12. *Dorokhov V.B.* Alpha bursts and K-complex: phasic activation pattern during spontaneous recovery of correct psychomotor performance at different stages of drowsiness. Zhurn. Vyssh. Nerv. Deiat. im. I.P. Pavlova. 2003. V. 53. № 4. P. 503–512.
13. *Faber J., Novak M.* Thalamo-cortical reverberation in the brain produces alpha and delta rhythms as iterative convergence of fuzzy cognition in an uncertain environment. Neural Network World. 2011. V. 21. № 2. P. 169–192. DOI: <https://doi.org/10.14311/NNW.2011.21.011>
14. *Harmony T.* The functional significance of delta oscillations in cognitive processing. Front Integr Neurosci. 2013. V. 7. Art. 83. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnint.2013.00083>
15. *Horton C.L.* Consciousness across sleep and wake: discontinuity and continuity of memory experiences as a reflection of consolidation processes. Front Psychiatry 2017. V. 8. Art. 159. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpsyt.2017.00159>

16. *Knyazev G.G., Savostyanov A.N., Bocharov A.V., Tamozhnikov S.S., Kozlova E.A., Leto I.V., Slobodskaya H.R.* Cross-Frequency Coupling in Developmental Perspective. *Front Hum Neurosci.* 2019. V. 13. Art. 158. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00158>
17. *Liu C.C., Chien J.H., Kim J.H., Chuang Y.F., Cheng D.T., Anderson W.S., Lenz F.A.* Cross-frequency coupling in deep brain structures upon processing the painful sensory inputs. *Neuroscience.* 2015. V. 10. № 303. P. 412–421. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2015.07.010>
18. *Miley A.Å., Kecklund G., Åkerstedt T.* Comparing two versions of the Karolinska Sleepiness Scale (KSS). *Sleep and Biological Rhythms.* 2016. V. 14. № 3. P. 257–260. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41105-016-0048-8>
19. *Morillas-Romero A., Tortella-Feliu M., Bornas X., Putman P.* Spontaneous EEG theta/beta ratio and delta–beta coupling in relation to attentional network functioning and self-reported attentional control. *Cognitive Affective & Behavioral Neuroscience.* 2015. V. 15. № 3. P. 598–606. DOI: <https://doi.org/10.3758/s13415-015-0351-x>
20. *Morin C.M.* Insomnia, psychological assessment and management. New York: Guilford Press, 1993. 238 p. DOI: <https://doi.org/10.1192/s0007125000075401>
21. *Rutherford H.J.V., Guo X.M., Wu J., Graber K.M., Hayes N.J., Pelfrey K.A., Mayes L.* Intranasal oxytocin decreases cross-frequency coupling of neural oscillations at rest. *Int. Journ. Psychophysiol.* 2018. V. 123. P. 143–151. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2017.09.017>
22. *Saadatmehr B., Edalati M., Routier L., Mahmoudzadeh M., Safaie J., Kongolo G., Ghostine G., Wallois F., Moghimi S.* Evolution of cross-frequency coupling between endogenous oscillations over the temporal cortex in very premature neonates. *Cereb. Cortex.* 2022. V. 33. № 2. P. 278–289. DOI: <https://doi.org/10.1093/cercor/bhac067>
23. *Samiee S., Vuvan D., Florin E., Albouy P., Peretz I., Baillet S.* Cross-frequency brain network dynamics support pitch change detection affiliations expand. *The Journal of Neuroscience.* 2022. V. 42. № 18. P. 3823–3835. DOI: <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0630-21.2022>
24. *Steriade M.* Grouping of brain rhythms in cortico thalamic systems. *Neuroscience.* 2006. V. 137. № 4. P. 1087–1106. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2005.10.029>
25. *Tamaki M., Bang J.W., Watanabe T., Sasaki Y.* Night watch in one brain hemisphere during sleep associated with the first-night effect in humans. *Curr. Biol.* 2016. V. 26. № 9. P. 1190–1194. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2016.02.063>
26. *Trotti L.M.* Waking up is the hardest thing I do all day: Sleep inertia and sleep drunkenness. *Sleep Med. Rev.* 2017. V. 35. P. 76–84. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.smrv.2016.08.005>
27. *Wang B., Yang L., Yan W., An W., Xiang J., Li D.* Brain asymmetry: a novel perspective on hemispheric network. *Brain Science Advances.* 2023. V. 9. № 2. P. 56–77. DOI: <https://doi.org/10.26599/BSA.2023.9050014>
28. *Windt J.M.* Consciousness in sleep: How findings from sleep and dream research challenge our understanding of sleep, waking, and consciousness. *Philosophy Compass.* 2020. e12661. P. 1–16. DOI: <https://doi.org/10.1111/phc3.12661>
29. *Vallat R., Meunier D., Nicolas A., Ruby P.* Hard to wake up? The cerebral correlates of sleep inertia assessed using combined behavioral, EEG and fMRI measures. *Neuroimage.* 2019. V. 184. P. 266–278. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.09.033>
30. *Yang L., Leung H., Plank M., Snider J., Poizner H.* EEG activity during movement planning encodes upcoming peak speed and acceleration and improves the accuracy in predicting hand kinematics. *IEEE J Biomed Health Inform.* 2015. V. 19. № 1. P. 22–28. DOI: <https://doi.org/10.1109/JBHI.2014.2327635>
31. *Zaepffel M., Trachel R., Kilavik B.E., Brochier T.* Modulations of EEG Beta Power during Planning and Execution of Grasping Movements. *PLoS One.* 2013. V. 8. № 3. e60060. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0060060>