

Научная статья

УДК 612.821.6

<https://doi.org/10.21702/rpj.2026.1.10>

Связи ритмов ЭЭГ в полушариях мозга как нейрофизиологическая основа процесса пробуждения

Ирина А. Яковенко , Евгений А. Черемушкин* ,
Владимир Б. Дорохов 

Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Москва,
Россия

*Почта ответственного автора: ivnd@mail.ru

Аннотация

Введение. Изучение межполушарной асимметрии при пробуждении из разных фаз сна остается актуальным в настоящее время. Новизна нашего исследования заключается в выявлении связанности одновременно функционирующих корково-подкорковых систем мозга. Цель проведенного исследования – выявление межполушарной асимметрии при пробуждении из 2 стадии дневного сна по показателям амплитудно-амплитудных связей ритмов ЭЭГ. Рассматривалось когнитивное пробуждение с разной эффективностью выполнения задания на модели психомоторного теста. **Методы.** Одновременно с выполнением задания регистрировали многоканальную ЭЭГ. ЭЭГ оценивали на основе «материнского» комплексного Morlet-вейвлета. Мерой амплитудно-амплитудного взаимодействия ритмов ЭЭГ служил коэффициент корреляции Кендалла. **Результаты.** Отмечена большая площадь распространения асимметричных процессов в левом полушарии при полном восстановлении задания (по сравнению с неполным) на самом близком отрезке к началу нажатий. Пробуждение, сопровождающееся полным восстановлением деятельности, характеризовалось на временном отрезке 8–5 с преобладанием связей дельта-ритма в обоих полушариях, на отрезке 4–1 с стали преобладать связи тета-ритма, а также гамма-ритма. При неполном восстановлении деятельности отмечено увеличение числа связей дельта-ритма на отрезке 4–1 с по

сравнению с отрезком 8-5 с. **Обсуждение результатов.** Когнитивное пробуждение, сопровождающееся разной эффективностью выполнения задания, характеризуется наличием межполушарной асимметрии по показателю связей ритмов ЭЭГ. Асимметрия формируется как за счет различного расположения связей по коре больших полушарий, так и набора связей. В двух экспериментальных ситуациях выявлено различное взаимодействие ритмов ЭЭГ, а следовательно, в ряде областей неодинаковое взаимодействие таламо-кортикальной и кортико-гиппокампальной систем.

Ключевые слова

межполушарная асимметрия мозга, пробуждение, психомоторный тест, амплитудно-амплитудное взаимодействие ритмов ЭЭГ

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания ИВНД и НФ РАН Министерства образования и науки Российской Федерации на 2025–2027 годы.

Для цитирования

Яковенко, И. А., Черемушкин, Е. А., & Дорохов, В. Б. (2026). Связи ритмов ЭЭГ в полушариях мозга как нейрофизиологическая основа процесса пробуждения. *Российский психологический журнал*, 23(1), 195–207. <https://doi.org/10.21702/rpj.2026.1.10>

Введение

Суточный цикл человека состоит из дневного бодрствования и сна. Бодрствование включает в себя различные виды деятельности, иногда перемежающиеся сном. На основе своих наблюдений А.Р. Лурия сформулировал идею о трех структурно-функциональных блоков мозга. Различные психические функции обеспечиваются совместной динамической работой этих блоков в обоих полушариях мозга. 1 блок – «энергетический», который поддерживает оптимальный уровень психической активности. Этот блок регулирует, в частности, цикл «сон-бодрствование» и сознание (Лурия, 1973). Дневной сон улучшает когнитивные способности, способствует восстановлению работоспособности (Ficca et al., 2010). Нарушения сна, выражающиеся, в частности, в необходимости работы в ночное время, а также в условиях его депривации днем, могут приводить к дремоте и засыпанию. В случае экстренного или самопроизвольного пробуждения возобновление работы происходит на фоне замедления двигательных реакций и принятия решений, что влияет на ее эффективность. Период, непосредственно предшествующий началу деятельности в условиях инерции сна (Santhi et al., 2013), а также сопровождающие его объективные

нейрофизиологические характеристики исследованы недостаточно. При этом может наблюдаться неодинаковое восстановление, приводящее к различной эффективности выполнения задания. Какие же проявления мозговой активности лежат в основе данного явления? Пробуждение – процесс пролонгированный. В этот момент происходят некие перестройки в работе мозга, позволяющие в дальнейшем продолжить начатую работу в случае ее прерывания на сон.

U. Voss (2010) разделяет пробуждение на два этапа: 1 этап – когнитивное пробуждение, которое характеризуется тем, что человек воспринимает привходящую информацию, но еще не в состоянии совершать двигательную ответную реакцию, и 2 этап – поведенческое пробуждение, когда человек не только воспринимает стимулы, но и дает моторный ответ. Пробуждение связано с переходом сознания с уровня, наблюдаемого во сне, на уровень бодрствования. Авторы (Horton, 2017; Windt, 2020) делают предположение о существовании сознания во сне. (Liu, Li & Bai, 2023) исследовали показатели ЭЭГ лобной и теменной областей, которые, по их мнению, демонстрировали высокую релевантность с сознанием. Авторы утверждают, что снижение уровня сознания сопровождается усилением низкочастотных ритмов, подавлением высокочастотных ритмов, снижением динамической сложности и разрушением сетей. Таким образом, изучение нейрофизиологических основ стадии когнитивного пробуждения в определенной мере дает ответ на вопрос, какова же будет эффективность работы после пробуждения. При этом необходимо учитывать вклад полушарий мозга в процесс пробуждения. (Casagrande & Bertini, 2008) в своей работе по изучаемым параметрам доказали устойчивое преимущество правого полушария при пробуждении как из быстрого, так и из NREM-сна, а также при переходе от сна к бодрствованию. Результаты (Aritake et al., 2012) демонстрируют корреляцию между самопробуждением и предшествующим повышением гемодинамической активации в правой префронтальной коре, что свидетельствует о вкладе этой структуры в способность оценивать время.

Целью нашего исследования было выявление межполушарной асимметрии при пробуждении из 2 стадии дневного сна.

Задача работы – поиск кроссчастотных связей ритмов ЭЭГ в полушариях мозга при пробуждении с разной эффективностью выполнения задания.

Методы

Представленное исследование соответствует этическим нормам Хельсинской декларации Всемирной медицинской ассоциации «Этические принципы проведения научных медицинских исследований с участием человека» с поправками 2000 г., а также одобрено этической комиссией ИВНД и НФ РАН (протокол №2 от 3 июня 2019 года).

Эксперимент проведен на 83 испытуемых, студентах, практически здоровых молодых людей в возрасте от 18 до 22 лет. Критериями отбора экспериментального

материала для данной статьи служили: а) пробуждение из 2 стадии дневного сна, б) начало нажатий после пробуждения правой рукой, в) у одного и того же испытуемого наблюдались ситуации полного и неполного восстановления психомоторной деятельности. Было отобрано 15 испытуемых, число исследуемых ситуаций варьировалось у них от 2 до 8.

Опыт проводился в дневное время, с 13 до 14 часов. Место его проведения – затемненное, звукоизолирующее помещение. Испытуемый располагался на кушетке. Экспериментальная модель – бимануальный психомоторный тест (Dorokhov et al., 2021). Испытуемому предписывалось нажимать на кнопки правой и левой рукой по 10 раз поочередно до момента засыпания. Было оговорено, что в случае засыпания и самопроизвольного пробуждения испытуемый должен был продолжать нажимать на кнопки.

Во время выполнения задания регистрировали ЭЭГ от 19 хлорсеребряных электродов 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). Также записывались электроокулограмма и механограммы нажатий на кнопки.

Анализировали ЭЭГ перед пробуждением, за которым следовало возобновление выполнения заданий теста – неполное и полное. При неполном – субъект нажимал на кнопку правой, а затем левой рукой от 7 до 9 раз, при полном – по 10 раз. Выделяли две 4-х секундные эпохи анализа, предшествующие пробуждению.

На основе комплексного Morlet-вейвлета (Matlab 78.01) вычисляли модуль коэффициентов вейвлет-преобразования (МКВП). Полученный параметр рассматривали как амплитудную характеристику ЭЭГ. МКВП вычисляли в диапазоне 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 отдельных отведений ЭЭГ.

Использовали кроссчастотное взаимодействие ритмов ЭЭГ, которое позволяет оценивать функциональное взаимодействие структур или систем мозга (Knyazev et al., 2019; Salimpour & William, 2019; Siems & Siegel, 2020; Schanze & Eckhorn, 1997; Rodriguez-Martinez et al., 2015; Canolty & Knight, 2010; Яковенко и др., 2022; Yakovenko et al., 2024). Коэффициент парной корреляции Кендалла (КК) служил мерой амплитудно-амплитудного взаимодействия ритмов ЭЭГ. Этот счет проводили для всех пар ритмов.

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

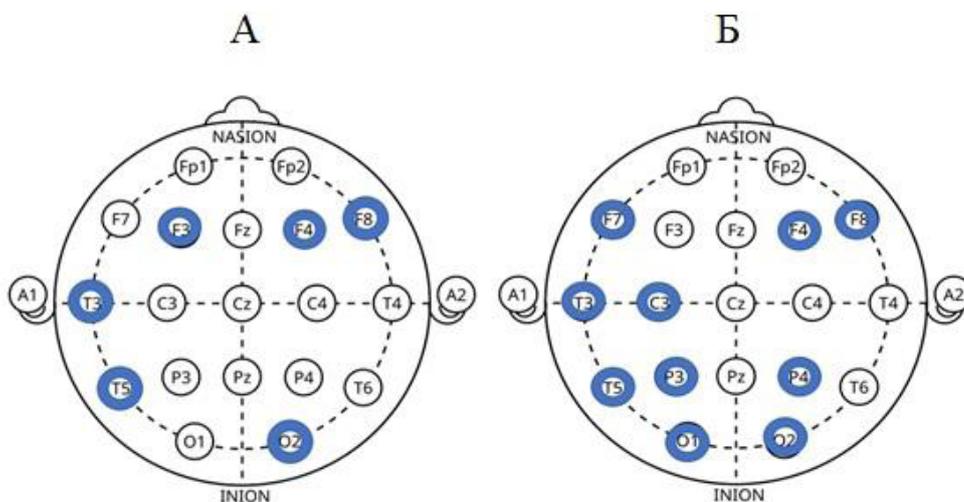
Результаты

Когнитивное пробуждение с полным восстановлением деятельности, которое характеризуется 10-кратными паттернами нажатий на кнопки сначала правой, а следом – левой рукой, сопровождалось наличием асимметричных связей как в левом,

так и правом полушариях на двух изучаемых временных отрезках. Независимо от локализации в полушариях, связи относятся к асимметричным по своему содержанию: связи ритмов ЭЭГ не дублируются. На временном отрезке 8–5 с до начала деятельности асимметрия связей формируется в лобной и височных областях левого полушария, и в лобных и затылочной правого. При этом наблюдается несколько большее распространение связей ритмов ЭЭГ в правом полушарии во фронтальных областях по сравнению с левым. В левом полушарии наблюдаются связи ритмов в височных областях, чего нет в правом. Также в правом полушарии отмечены связи в затылочной области. Отдельного внимания заслуживают отведения F3 и F4. Они симметричны по расположению, но асимметричны по наборам связей ЭЭГ. На временном отрезке 4–1 с область распространения асимметричных связей увеличивается: к уже существующим связям ритмов ЭЭГ добавляются связи в центральной области левого полушария и теменных обоих полушарий (Рис. 1).

Рисунок 1

Локализация асимметричных связей ритмов ЭЭГ в полушариях мозга при полном когнитивном пробуждении



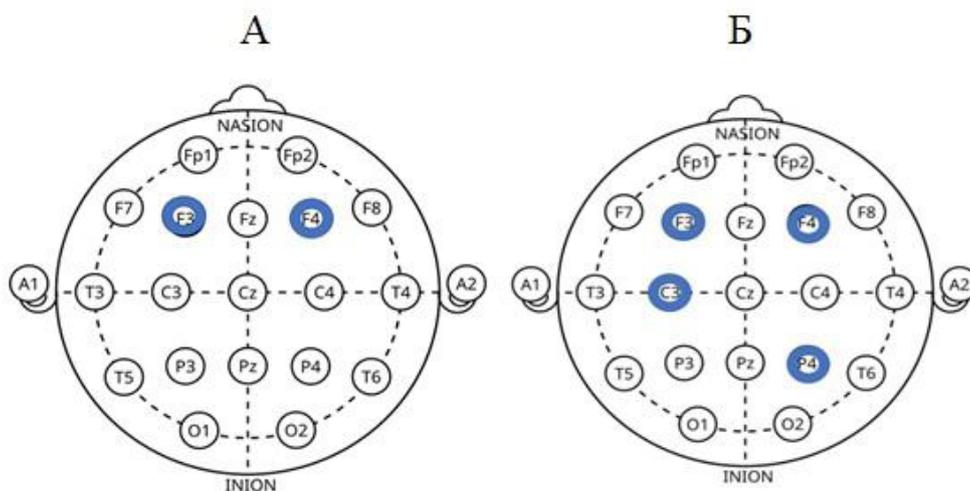
Примечания. А – полное пробуждение в интервале 8–5 с; Б – в интервале 4–1 с. Круги с окантовкой – наличие достоверных связей ритмов. На картах-схемах приведены названия отведений ЭЭГ.

Когнитивное пробуждение, сопровождающееся последующим неполным восстановлением деятельности (субъект нажимал на кнопку правой, а затем левой рукой от 7 до 9 раз), характеризуется сходной локализацией (отведения F3 и F4) асимметричных связей ритмов ЭЭГ на отрезке времени 8–5 с до начала нажатий

правой рукой. Самый близкий к пробуждению отрезок времени (4–1 с) демонстрирует подключение левой центральной и правой теменной областей мозга (Рис. 2)

Рисунок 2

Локализация асимметричных связей ритмов ЭЭГ в полушариях мозга при неполном когнитивном пробуждении



Примечания. А – неполное пробуждение в интервале 8–5 с; Б – в интервале 4–1 с. Круги с окантовкой – наличие достоверных связей ритмов. На картах-схемах приведены названия отведений ЭЭГ.

Таким образом, разные виды когнитивного пробуждения сопряжены с различной локализацией в полушариях асимметричных связей ритмов ЭЭГ и различаются шириной распространения этих связей по коре.

Какие же связи ритмов ЭЭГ формируют описанную асимметрию? Из табл. 1 видно, что за 8–5 с до начала нажатий при полном пробуждении наблюдается подавляющее большинство связей дельта ритма в обоих полушариях. При неполном пробуждении асимметричных связей ритмов ЭЭГ меньше, и они разнообразнее: помимо связи дельта-ритма присутствует связь тета-гамма, а также бета-гамма.

Таблица 1

Достоверные взаимосвязи ритмов ЭЭГ в отдельных отведениях левого и правого полушарий при разных видах пробуждения на временном отрезке 8–5 с

| Полное когнитивное пробуждение | | Неполное когнитивное пробуждение | |
|--------------------------------|---|----------------------------------|---|
| Отведения | Связи ритмов ЭЭГ | Отведения | Связи ритмов ЭЭГ |
| F3 | Δ - α 1 | F3 | Δ - γ , θ - γ |
| F4 | Δ - β , α 2- γ | F4 | β - γ |
| F8 | Δ - β , Δ - γ | | |
| T3 | Δ - γ | | |
| T5 | Δ - α 2, Δ - β , Δ - γ | | |
| O2 | Δ - β | | |

Примечания. Δ , θ , α 1, α 2, β , γ – дельта-, тета-, альфа1-, альфа2-, бета- и гамма-ритмы ЭЭГ соответственно.

Таким образом, на отрезке времени 8–5 с до начала нажатий виды пробуждения различаются набором связей ритмов ЭЭГ.

На временном отрезке 4–1 с при полном пробуждении наблюдается преобладание связей тета и альфа ритмов, которые, практически, всегда связаны с гамма-ритмом в обоих полушариях. Связи дельта-ритма представлены несколько меньше. Асимметрия формируется, в основном, за счет большего числа тета, альфа и гамма связей ритмов ЭЭГ левого полушария. При неполном пробуждении преобладают связи дельта-ритма. Асимметрия формируется за счет как качественного различия связей, так и их местоположения (см. табл. 2).

Таблица 2

Достоверные взаимосвязи ритмов ЭЭГ в отдельных отведениях левого и правого полушарий при разных видах пробуждения на временном отрезке 4–1 с.

| Полное когнитивное пробуждение | | Неполное когнитивное пробуждение | |
|--------------------------------|---|----------------------------------|--|
| Отведения | Связи ритмов ЭЭГ | Отведения | Связи ритмов ЭЭГ |
| | | F3 | Δ - α 1, Δ - α 2 |
| F4 | θ - β , θ - γ | F4 | α 2- γ |
| F7 | θ - β , θ - γ , α 1- γ | | |
| F8 | β - γ | | |

| Полное когнитивное пробуждение | | Неполное когнитивное пробуждение | |
|--------------------------------|---|----------------------------------|---|
| Отведения | Связи ритмов ЭЭГ | Отведения | Связи ритмов ЭЭГ |
| C3 | $\alpha 1-\gamma, \alpha 2-\gamma, \beta-\gamma$ | C3 | $\Delta-\alpha 1, \Delta-\alpha 2, \theta-\alpha 1, \alpha 1-\gamma, \alpha 2-\gamma$ |
| T3 | $\Delta-\gamma, \theta-\gamma, \alpha 2-\gamma$ | | |
| T5 | $\Delta-\gamma, \theta-\gamma$ | | |
| P3 | $\theta-\gamma, \alpha 1-\gamma, \alpha 2-\gamma$ | | |
| P4 | $\Delta-\alpha 1, \theta-\alpha 1, \theta-\alpha 2, \theta-\beta$ | P4 | $\Delta-\alpha 1, \Delta-\alpha 2, \Delta-\beta, \theta-\alpha 2$ |
| O1 | $\theta-\alpha 1, \theta-\alpha 2, \theta-\gamma$ | | |
| O2 | $\Delta-\alpha 2$ | | |

Примечания. $\Delta, \theta, \alpha 1, \alpha 2, \beta, \gamma$ – дельта-, тета-, альфа1-, альфа2-, бета- и гамма-ритмы ЭЭГ соответственно.

Таким образом, помимо различной локализации связей ритмов ЭЭГ в полушариях, показано и различие в структуре связей при разных видах когнитивного пробуждения.

Обсуждение результатов

Полное пробуждение сопровождается более широким распространением по коре асимметричных связей ритмов по сравнению с неполным. На временном отрезке 8–5 с достоверные связи ритмов охватывают лобную и височные области коры левого полушария, а также лобные и затылочную области правого полушария. Эти данные в определенной мере согласуются с результатами работы (Yang et al., 2015). Временной отрезок, максимально приближенный к началу выполнения задания (4–1 с), характеризуется более широким охватом поверхности коры больших полушарий. При неполном пробуждении на отрезке 8–5 с асимметрия наблюдается только в лобных областях. На отрезке 4–1 с асимметричные связи ритмов наблюдались не только в лобных, но и в левой центральной и правой теменной областях. Можно сделать предположение о том, что наличие большего числа асимметричных связей на большем пространстве коры больших полушарий связано с возможностью более полноценного пробуждения и готовности к выполнению задания. Тогда как при неполном пробуждении наличие меньшего количества асимметричных связей ритмов ЭЭГ, вероятно, не позволяет поддерживать определенный уровень активации структур, необходимый для успешного выполнения задания.

Сопоставление распределения связей ритмов ЭЭГ при полном и неполном пробуждениях на когнитивной и поведенческой стадиях (Яковенко и др., 2024) позволяет сделать заключение об участии лобных областей обоих полушарий в процессе любого вида пробуждения. Как при полном, так и при неполном когнитивном пробуждении отмечается симметричное по положению, но асимметричное по набору связей участие лобных областей полушарий. При полном поведенческом пробуждении сохраняется такое же распределение связей ритмов ЭЭГ. При неполном когнитивном пробуждении участвуют лобные области обоих полушарий, а при поведенческом – только лобная область левого полушария. Это дает основание сделать предположение об участии правой лобной области не только в процессе пробуждения, но и более длительном удерживании мозга в бодрствующем состоянии. В работе (Aritake et al., 2012) говорится о связи произвольного пробуждения и предшествующего повышения гемодинамической активации в правой префронтальной коре. Эти данные в определенной мере согласуются с нашими результатами.

Рассмотрим, какие связи ритмов ЭЭГ участвуют в формировании межполушарной асимметрии при когнитивном пробуждении. Пробуждение при полном восстановлении деятельности сопровождается большим числом связей дельта-ритма в обоих полушариях за 8–5 с до начала нажатий. В работе (Hilditch et al., 2021) говорится о том, что дельта- и бета-диапазоны играют решающую роль в изменениях сети при переходе от сна к бодрствованию. Дельта-ритм отражает функционирование таламо-кортикальной системы (Steriade, 2006; Faber & Novak, 2011; Манюхина и др., 2020). При этом в левом полушарии он связан не только с быстрыми (бета и гамма) ритмами, но и с альфа-ритмом. Альфа-ритм, подобно дельта, отражает работу таламо-кортикальной системы (Faber & Novak, 2011). Исходя из этого, можно сделать предположение о том, что связи дельта-ритма с быстрыми ритмами могут свидетельствовать о большей активации вышеуказанной корково-подкорковой системы; а связи дельта-ритма с альфа, вероятно, свидетельствуют о более значительном участии этой системы в процессе пробуждения. Дельта-ритм характерен как для состояния сна, так и для бодрствования (Harmony, 2013). Возможно, здесь происходит «передача полномочий» с той части таламо-кортикальной системы, которая участвует во сне, к той, которая обеспечивает состояние бодрствования. Временной отрезок 4–1 с до начала нажатий демонстрирует преобладание связей тета-ритма в обоих полушариях, в основном, с бета и гамма ритмами. Тета-ритм отражает функционирование кортико-гиппокампальной системы, которая участвует в процессах памяти (Vertes, Hoover & Di Prisco, 2004; Barnett et al., 2021). Исходя из этого можно сделать предположение о большей активации этой корково-подкорковой системы и извлечении из памяти инструкции для работы. На этом же временном отрезке можно увидеть большую представленность тета, альфа и гамма связей в левом полушарии. Все это может свидетельствовать о подготовке к нажатию кнопки правой рукой. В исследовании (Dos Santos Lima et al., 2019) описан динамический паттерн активации гиппокампа и коры головного мозга, связанный с microarousal во время сна у мышей. Отмечено увеличение кортико-гиппокампальной когерентности, в дельта- и тета-диапазонах и пиках (2,5–5,5 Гц).

Пробуждение с неполным восстановлением деятельности демонстрирует существенно меньшее число асимметричных связей в полушариях, которые наблюдаются только в лобных областях на временном интервале 8–5 с до начала деятельности. Здесь отмечено только две связи: дельта-гамма и тета-гамма в левом полушарии и бета- гамма – в правом. Можно предполагать, что в лобных областях наблюдается некий более ограниченный процесс активации таламо-кортикальной и кортико-гиппокампальной систем. Следующий интервал (4–1 с) сопровождался в основном связями дельта-альфа ритмов и альфа-гамма ритмов. В это время наблюдается большой охват поверхности коры больших полушарий асимметричными процессами. Увеличение числа связей дельта-альфа может говорить в пользу более широкого участия таламо-кортикальной системы в процессе пробуждения. Меньше представлены связи тета-ритма, которые обеспечивают воспроизведение инструкции.

Отдельного внимания заслуживают связи гамма-ритма. Сравнение связей гамма-ритма при полном и неполном когнитивном пробуждении выявило самую большую его представленность на временном отрезке 4–1 с в левом полушарии при полном восстановлении деятельности. Авторы (Данилова и др., 2002) описывают наличие гамма-ритма в различных структурах мозга. Они считают, что этот ритм является функциональным строительным блоком, который связан не только с различными когнитивными процессами, но и с сознанием. В работе (Doesburg et al., 2009) высказано предположение о том, что осознанное восприятие сопровождается наличием крупномасштабных ансамблей гамма-синхронных нейронных популяций, связанных с тета-ритмом. Опираясь на эти работы, можно высказать предположение о том, что в это время сознание выходит на новый уровень, иными словами, происходит подготовка к выполнению задания.

Когнитивное пробуждение, сопровождающееся разной эффективностью выполнения задания, характеризуется наличием межполушарной асимметрии по показателю связей ритмов ЭЭГ. Асимметрия формируется как за счет различного расположения связей по коре больших полушарий, так и набора связей в областях коры больших полушарий. Мы предполагаем, что эти результаты характеризуют разные уровни сознания, проявляющиеся при когнитивном пробуждении.

Заключение

Когнитивное пробуждение при полном и неполном восстановлении деятельности различается площадью распространения асимметричных процессов в полушариях: гораздо большая площадь отмечена в левом полушарии при полном восстановлении задания на самом близком отрезке к началу нажатий. Виды пробуждения различаются количеством связей. Количество связей ритмов ЭЭГ существенно больше при полном пробуждении по сравнению с неполным. Самое большое количество связей отмечено в левом полушарии на отрезке 4–1 с до пробуждения при полном восстановлении

деятельности. Пробуждение, сопровождающееся полным восстановлением деятельности, характеризовалось на временном отрезке 8–5 с преобладанием связей дельта-ритма в обоих полушариях, на отрезке 4–1 с стали преобладать связи тета-ритма, а также гамма-ритма. При неполном восстановлении деятельности отмечено увеличение числа связей дельта-ритма на отрезке 4–1 с по сравнению с отрезком 8–5 с.

Литература

- Данилова, Н. Н., Быкова, Н. Б., Анисимов, Н. В., Пирогов, Ю. А., & Соколов, Е. Н. (2002). Гамма-ритм электрической активности мозга человека в сенсорном кодировании. *Биомедицинские технологии и радиоэлектроника*, 3, 34–41.
- Лурия, А. Р. (1973). *Основы нейропсихологии*. Москва: Издательство Московского университета.
- Манюхина, В. О., Томьшев, А. С., Каледа, В. Г., & Лебедева, И. С. (2020). Структурные особенности таламо-кортикальной системы и спектральные характеристики альфа-ритма у психически здоровых людей и больных шизофренией. *Физиология человека*, 46(6), 50–59. <https://doi.org/10.31857/S0131164620050082>
- Яковенко, И. А., Петренко, Н. Е., Черемушкин, Е. А., & Дорохов, В. Б. (2022). Динамика взаимодействия ритмов ЭЭГ, предшествующая моменту пробуждения, с последующим восстановлением деятельности после кратковременных эпизодов засыпаний. *Российский физиологический журнал им. И. М. Сеченова*, 108(4), 443–454. <https://doi.org/10.31857/S0869813922040094>
- Яковенко, И. А., Петренко, Н. Е., Черемушкин, Е. А., & Дорохов, В. Б. (2024). Межполушарные различия связей между ритмами ЭЭГ при полном и неполном пробуждении. *Психологический журнал*, 45(6), 73–84. <https://doi.org/10.31857/S0205959224060078>
- Aritake, S., Higuchi, S., Suzuki, H., Kuriyama, K., Enomoto, M., Soshi, T., Kitamura, S., Hida, A., & Mishima, K. (2012). Increased cerebral blood flow in the right frontal lobe area during sleep precedes self-awakening in humans. *BMC Neuroscience*, 13(1), 153–163. <https://doi.org/10.1186/1471-2202-13-153>
- Barnett, A. J., Reilly, W., Dimsdale-Zucker, H. R., Mizrak, E., Reagh, Z., & Ranganath, C. (2021). Intrinsic connectivity reveals functionally distinct cortico-hippocampal networks in the human brain. *PLoS Biology*, 19(6), e3001275. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3001275>
- Canolty, R. T., & Knight, R. T. (2010). The functional role of cross-frequency coupling. *Trends in Cognitive Sciences*, 14(11), 506–517. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2010.09.001>
- Casagrande, M., & Bertini, M. (2008). Laterality of sleep onset process: Which hemisphere goes to sleep first? *Biological Psychology*, 77, 76–80. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2007.09.007>
- Doesburg, S. M., Green, J. J., McDonald, J. J., & Ward, L. M. (2009). Rhythms of consciousness: Binocular rivalry reveals large-scale oscillatory network dynamics mediating visual perception. *PLoS ONE*, 4(7), e6142. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0006142>
- Dorokhov, V. B., Tkachenko, O. N., Ushakov, V. L., & Chernorizov, A. M. (2021). Neuronal correlates of spontaneous awakening and recovery of psychomotor performance. In B. M. Velichkovsky, P. M. Balaban, & V. L. Ushakov (Eds.), *Advances in cognitive research, artificial intelligence and neuroinformatics. InterCoWorks 2020. Advances in intelligent systems and computing* (Vol. 1358). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-71637-0_49
- Faber, J., & Novak, M. (2011). Thalamo-cortical reverberation in the brain produces alpha and delta rhythms as iterative convergence of fuzzy cognition in an uncertain environment. *Neural Network World*, 21(2), 169–192. <https://doi.org/10.14311/NNW.2011.21.011>
- Ficca, G., Axelsson, J., Mollicone, D. J., Muto, V., & Vitiello, M. V. (2010). Naps, cognition and performance. *Sleep Medicine Reviews*, 14(4), 249–258. <https://doi.org/10.1016/j.smrv.2009.09.005>

- Harmony, T. (2013). The functional significance of delta oscillations in cognitive processing. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 7, Article 83. <https://doi.org/10.3389/fmint.2013.00083>
- Hilditch, C. J., Bansal, K., Chachad, R., Wong, L. R., Bathurst, N. G., Feick, N. H., Santamaria, A., Shattuck, N. L., Garcia, J. O., & Flynn-Evans, E. E. (2021). Reconfigurations in brain networks upon awakening from slow wave sleep: Interventions and implications in neural communication. *bioRxiv*. <https://doi.org/10.1101/2021.12.07.471633>
- Horton, C. L. (2017). Consciousness across sleep and wake: Discontinuity and continuity of memory experiences as a reflection of consolidation processes. *Frontiers in Psychiatry*, 8, Article 159. <https://doi.org/10.3389/fpsyt.2017.00159>
- Knyazev, G. G., Savostyanov, A. N., Bocharov, A. V., & Tamozhnikov, S. (2019). Cross-frequency coupling in developmental perspective. *Frontiers in Human Neuroscience*, 13, Article 158. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00158>
- Liu, Y., Li, Z., & Bai, Y. (2023). Frontal and parietal lobes play crucial roles in understanding the disorder of consciousness: A perspective from electroencephalogram studies. *Frontiers in Neuroscience*, 16, 1024278. <https://doi.org/10.3389/fnins.2022.1024278>
- Salimpour, Y., & Anderson, W. S. (2019). Cross-frequency coupling-based neuromodulation for treating neurological disorders. *Frontiers in Neuroscience*, 13, 125. <https://doi.org/10.3389/fnins.2019.00125>
- Santhi, N., Groeger, J. A., Archer, S. N., Gimenez, M., Schlangen, L. J. M., & Dijk, D.-J. (2013). Morning sleep inertia in alertness and performance: Effect of cognitive domain and white light conditions. *PLoS ONE*, 8(11), e79688. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0079688>
- Dos Santos Lima, G. Z., Lobão-Soares, B., Corso, G., Belchior, H., Lopes, S. R., de Lima Prado, T., Nascimento, G., de França, A. C., Fontenele-Araújo, J., & Ivanov, P. C. (2019). Hippocampal and cortical communication around micro-arousals in slow-wave sleep. *Scientific Reports*, 9(1), 5876–5889. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42100-5>
- Schanze, T., & Eckhorn, R. (1997). Phase correlation among rhythms present at different frequencies: Spectral methods, application to microelectrode recordings from visual cortex and functional implications. *International Journal of Psychophysiology*, 26, 171–189. [https://doi.org/10.1016/S0167-8760\(97\)00763-0](https://doi.org/10.1016/S0167-8760(97)00763-0)
- Siems, M., & Siegel, M. (2020). Dissociated neuronal phase- and amplitude-coupling patterns in the human brain. *NeuroImage*, 209, 116538. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.116538>
- Steriade, M. (2006). Grouping of brain rhythms in corticothalamic systems. *Neuroscience*, 137(4), 1087–1106. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2005.10.029>
- Rodriguez-Martinez, E. I., Barriga-Paulino, C. I., Rojas-Benjumea, M. A., & Gomez, C. M. (2015). Co-maturation of theta and low-beta rhythms during child development. *Brain Topography*, 28, 250–260. <https://doi.org/10.1007/s10548-014-0369-3>
- Windt, J. M. (2020). Consciousness in sleep: How findings from sleep and dream research challenge our understanding of sleep, waking, and consciousness. *Philosophy Compass*, 15(6), e12661. <https://doi.org/10.1111/phc3.12661>
- Vertes, R. P., Hoover, W. B., & Di Prisco, G. V. (2004). Theta rhythm of the hippocampus: Subcortical control and functional significance. *Behavioral and Cognitive Neuroscience Reviews*, 3(3), 173–200. <https://doi.org/10.1177/1534582304273594>
- Voss, U. (2010). Changes in EEG pre and post awakening. *International Review of Neurobiology*, 93, 23–56. [https://doi.org/10.1016/S0074-7742\(10\)93002-X](https://doi.org/10.1016/S0074-7742(10)93002-X)
- Yakovenko, I. A., Petrenko, N. E., Tkachenko, O. N., Gandina, E. O., Puchkova, A. N., & Dorokhov, V. B. (2024). Interhemispheric asymmetry of the EEG rhythms coupling accompanies cognitive awakening during bimanual performance of a psychomotor test. *The European Physical Journal Special Topics*, 233, 607–614. <https://doi.org/10.1140/epjs/s11734-023-01060-8>

Yang, L., Leung, H., Plank, M., Snider, J., & Poizner, H. (2015). EEG activity during movement planning encodes upcoming peak speed and acceleration and improves the accuracy in predicting hand kinematics. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 19(1), 22–28.

Поступила в редакцию: 03.06.2025

Поступила после рецензирования: 26.09.2025

Принята к публикации: 12.01.2026

Заявленный вклад авторов

Ирина Анатольевна Яковенко – проведение теоретического анализа по проблеме исследования, интерпретация и описание полученных количественных и качественных результатов

Евгений Алексеевич Черемушкин – количественная и качественная обработка полученных данных, оформление результатов в форме рисунков и таблиц

Владимир Борисович Дорохов – разработка концепции; подготовка текста статьи.

Информация об авторах

Ирина Анатольевна Яковенко – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории нейробиологии сна и бодрствования, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии Российской академии наук, Москва, Россия; Researcher ID: AAC-3123-2022, Scopus ID: 6601985071, Author ID: 94039, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0391-7266>; e-mail: irinayakovenko@mail.ru

Евгений Алексеевич Черемушкин – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории нейробиологии сна и бодрствования, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии Российской академии наук, Москва, Россия; Researcher ID: AAC-4483-2022, Scopus ID: 7004108942, Author ID: 82931, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6902-8077>; e-mail: ivnd@mail.ru

Владимир Борисович Дорохов – доктор биологических наук, заведующий лабораторией, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии Российской академии наук, Москва, Россия; Researcher ID: O-1030-2017, Scopus ID: 55230058000, Author ID: 89361, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3533-9496>; e-mail: vbdorokhov@mail.ru

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.