

DOI: 10.7868/S2658655X26020055  
УДК 612

Экспериментальная статья

## Исследование взаимодействия тета- и альфа-ритмов при пробуждении в зависимости от эффективности выполнения задания

И.А. Яковенко<sup>1,\*</sup>, Е.А. Черемушкин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН,  
Москва, Российская Федерация*

*\*E-mail: irinayakovenko@mail.ru*

*Аннотация.* Задачей предварительного исследования являлось выявление связей областей полушарий мозга на основе амплитудно-амплитудного взаимодействия тета- и альфа-ритмов при пробуждении с разной степенью восстановления деятельности. В исследованиях пробуждений из дневного сна для анализа была выделена группа 15 человек из 83 испытуемых, у которых в одном опыте наблюдалось полное и неполное восстановление когнитивной деятельности. В работе был использован бимануальный психомоторный тест, позволяющий наблюдать процесс пробуждения. На протяжении всего опыта записывали ЭЭГ от 19 хлорсеребряных электродов. Оценку амплитудных характеристик ЭЭГ осуществляли с использованием непрерывного вейвлет-преобразования на основе «материнского» комплексного Morlet-вейвлета. Коэффициент корреляции Кендалла служил мерой амплитудно-амплитудного взаимодействия исследуемых ритмов ЭЭГ между отведениями. Наибольшее число асимметричных связей по взаимодействию тета- и альфа-ритмов отмечалось в левой передневисочной области (связь с 10 областями), а также в левой средней височной области (связи с 6 областями) как внутри полушария, так и между полушариями при пробуждении с последующим полным восстановлением деятельности (по 10 нажатий и правой и левой рукой). При неполном восстановлении деятельности (от 7 до 9 нажатий на кнопки) при пробуждении показаны асимметричные связи правой средневисочной области полушария с 8 областями, левой – с 4 по взаимодействию тета-альфа ритмов. Левая задневисочная область объединяется с 9 регионами, а правая – с 5. Делается заключение, что процесс пробуждения с разной эффективностью восстановления деятельности характеризовался различиями в количестве как внутриполушарных, так и межполушарных связей областей мозга. Наибольшее число внутриполушарных и межполушарных связей альфа- и тета-ритмов наблюдалось при неполном восстановлении деятельности по сравнению с полным при пробуждении.

*Ключевые слова:* амплитудно-амплитудное взаимодействие ритмов ЭЭГ, связь таламокортикальной и кортико-гиппокампальной систем, пробуждение

*Финансирование.* Работа выполнена в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на 2024–2026 гг.

*Соблюдение этических стандартов.* 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 Института высшей нервной деятельности и нейрофизиологии и РАН (протокол № 2 от 3 июня 2019 г.). Каждый участник исследования дал добровольное письменное информированное согласие после получения разъяснений о потенциальных рисках и преимуществах, а также о характере предстоящего исследования.

*Конфликт интересов.* Явные и потенциальные конфликты интересов, связанные с публикацией данной статьи, отсутствуют.

*Вклад авторов в публикацию.* ИАЯ – написание и редактирование статьи, существенный вклад в анализ и интерпретацию данных для работы, согласие нести ответственность за все аспекты работы, а также гарантия того, что все вопросы по достоверности и надежности любой части работы надлежащим образом проанализированы и решены. ЕАЧ – сбор данных, обработка данных, участие в написании и редактировании статьи, согласие нести ответственность за все аспекты работы, а также гарантия того, что все вопросы по достоверности и надежности любой части работы надлежащим образом проанализированы и решены.

*Ссылка для цитирования:* Яковенко И.А., Черемушкин Е.А. Исследование взаимодействия тета- и альфа-ритмов при пробуждении в зависимости от эффективности выполнения задания. *Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова / Russian Journal of Physiology*. 2026. Т. 112. № 2. С. 486–502. <https://doi.org/10.7868/S2658655X26020055>

DOI: 10.7868/S2658655X26020055

Experimental article

## Interaction of Theta and Alpha Rhythms during Awakening Depending on the Effectiveness of Task Performance

I.A. Yakovenko<sup>1,\*</sup>, E.A. Cheryomushkin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology of the RAS, Moscow, Russian Federation*

*\*E-mail: irinayakovenko@mail.ru*

*Abstract.* The aim of the preliminary study was to identify connections between the cerebral hemisphere regions based on the amplitude-amplitude coupling of theta and alpha rhythms during awakening with varying degrees of activity restoration. A group of 15 people out of 83 subjects was selected for analysis in studies of awakening from daytime sleep. A bimanual psychomotor test was used in the work, allowing one to observe the awakening process. EEG was recorded from 18 silver–chloride

electrodes throughout the experiment. Evaluation of the amplitude characteristics of the EEG was carried out using a continuous wavelet transform based on the “mother” complex Morlet wavelet. The Kendall correlation coefficient served as a measure of the amplitude-amplitude coupling of the EEG rhythms. The largest number of asymmetric connections in the interaction of theta and alpha rhythms was noted in the left anterior temporal area (connection with 10 areas), as well as in the left middle temporal area (connections with 6 areas) both within the hemisphere and between the hemispheres upon awakening, followed by complete restoration of activity (10 presses with both the right and left hand). In the case of incomplete restoration of activity (from 7 to 9 button presses), asymmetric connections between the right middle temporal region of the hemisphere and 8 regions, and between the left region and 4 regions in terms of theta-alpha rhythm interaction, were observed upon awakening. The left posterior temporal region is connected to 9 regions, while the right region was connected to 5 regions. The awakening process, with varying levels of recovery, was characterized by differences in the number of both intra- and interhemispheric connections between brain regions. The greatest number of intra- and interhemispheric alpha and theta rhythm connections was observed during incomplete recovery compared to complete recovery upon awakening.

*Keywords:* EEG rhythms amplitude-amplitude coupling, connection of the thalamocortical and cortico-hippocampal systems, awakening, consciousness

*Funding.* The work was carried out as part of the State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for 2024–2026.

*Ethics declarations.* The work was carried out in accordance with the ethical standards of the World Medical Association’s Declaration of Helsinki “Ethical Principles for Medical Research Involving Human Subjects” as amended in 2000. The study was approved by the Ethics Committee of the Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology of the Russian Academy of Sciences (Protocol No. 2 dated June 3, 2019). Each participant provided voluntary written informed consent after being informed about the potential risks and benefits, as well as the nature of the study.

*Conflict of interests.* There are no apparent or potential conflicts of interest related to the publication of this article.

*Authors contribution.* IAYa – writing and editing the article, substantial contribution to the analysis and interpretation of data for the work, agreement to be responsible for all aspects of the work, and guarantee that all issues on the validity and reliability of any part of the work are properly analyzed and resolved. EAC – data collection, data processing, participation in the writing and editing of the article, agreement to be responsible for all aspects of the work, and guarantee that all issues on the validity and reliability of any part of the work are properly analyzed and resolved.

*For Citation:* Yakovenko I.A., Cheryomushkin E.A. Interaction of Theta and Alpha Rhythms during Awakening Depending on the Effectiveness of Task Performance. *Rossiiskij fiziologicheskij zhurnal im. I.M. Sechenova / Russian Journal of Physiology*. 2026;112(2):486–502. (In Russ.)  
<https://doi.org/10.7868/S2658655X26020055>

## ВВЕДЕНИЕ

Цикл сон—бодрствование достаточно хорошо изучен. Основное внимание уделяли нейрофизиологическим основам различных видов деятельности и сна. Пробуждение является переходным состоянием. Существует предположение о наличии признаков сознания во сне [1, 2], которые находят отражение в ЭЭГ. Показана активность лобной и теменной областей мозга, которые, по мнению авторов, коррелируют с сознанием. Утверждается, что снижение уровня сознания происходит на фоне усиления низкочастотных ритмов, подавления высокочастотных ритмов и снижения динамической сложности сетей [3]. Опираясь на эти данные, мы предполагаем, что при пробуждении происходит постепенный переход сознания с одного уровня на другой, более активированный, позволяющий перейти к осуществлению деятельности. Пробуждение, если и является одномоментным действием, то имеет ряд подготовительных стадий. Voss [4] в своей работе выделила два временных периода пробуждения. Первый, который она назвала когнитивным пробуждением, характеризуется тем, что человек воспринимает внешние стимулы, но еще не реагирует движением. Второй, поведенческое пробуждение, — человек в ответ на приходящие раздражители отвечает двигательной реакцией.

Процесс пробуждения может служить экспериментальной моделью исследования изменений уровня сознания. Клиника нуждается в биомаркерах, в том числе на основе данных ЭЭГ, которые бы характеризовали процесс восстановления сознания [5]. Wutzl с соавт. [6] показали, что у пациентов с синдромом невосприимчивого бодрствования по сравнению с пациентами с состоянием минимального сознания снижена мощность альфа-ритма, при этом мощность дельта-ритма, наоборот, повышена. В работе Fingelkurts с соавт. [7] оценка уровня сознания проводилась на основе микросостояний ЭЭГ. Микросостояния — это кратковременные стабильные поля паттерны потенциалов. По мнению авторов, сознание сопровождается появлением быстрых альфа-ритмических микросостояний, а бессознательные состояния — с возникновением медленных альфа-ритмических, дельта-ритмических и тета-ритмических микросостояний.

В наших исследованиях [8] было показано, что амплитудно-амплитудные связи ритмов ЭЭГ имеют сложную динамику в процессе пробуждения. В основном изучались интегральные характеристики (в целом по поверхности коры больших полушарий и отдельно для каждого полушария). Нами были выделены 3 блока связей ритмов: 1-й блок — связи альфа-ритма с бета- и гамма-ритмами и связи бета- и гамма-ритмов; 2-й блок — связи тета-ритма с альфа-, бета- и гамма-ритмами; 3-й блок — объединение дельта-ритма с тета- и альфа-ритмами. Эти данные были получены путем усреднения результатов, полученных от всех отведений (*grand mean*). Дороховым сформулирована гипотеза о том, что «воспроизведение информации из рабочей памяти во время сна» может вызывать пробуждение [9]. Известно, что в генерации альфа-ритма существенную роль играют как таламокортикальные [10], так и внутрикортикальные взаимодействия [11, 12]. Альфа-ритм является ритмом спокойного бодрствования и может принимать участие в осуществлении различных когнитивных процессов [13]. Тета-ритм связан с работой кортико-гиппокампальной корково-подкорковой системы [14]. Он также может отвечать за синхронизацию нейронной активности в различных областях коры [15]. Тета-ритм (в частности, гиппокамп) участвует в процессах памяти [16]. Поэтому для нашего исследования мы выбрали связь тета- и альфа-ритмов. Объединение

тета- и альфа-ритмов, вероятно, сопряжено с совместным функционированием двух вышеописанных систем.

В работах [17–19] были высказаны различные теории, объясняющие функциональный смысл связей ритмов ЭЭГ. Мы, в свою очередь, сделали предположение о том, что амплитудно-амплитудное взаимодействие ритмов ЭЭГ отражает наличие функциональной связи (а не просто одновременное функционирование) различных структур или объединений мозга ввиду того, что ритмы ЭЭГ имеют привязку к определенным структурам или корково-подкорковым системам мозга. Затем нами было проведено исследование связи ритмов в отдельных регионах коры больших полушарий [20]. Следующим закономерным шагом явилось изучение совместного функционирования регионов полушарий по наличию в них связей ритмов.

В работе [21] говорится о том, что в мозге для пробуждения важны длинные связи сети DMN (default mode network), которые, по мнению автора, отражают сложную координацию нейронных элементов. В исследованиях группы авторов [22] было показано, что после пробуждения в первые пять минут в группе испытуемых, которые хорошо запоминают сны, наблюдалась повышенная функциональная связность между областями DMN и несколькими областями, участвующими в процессах памяти.

Исследование на основе позитронно-эмиссионной томографии продемонстрировало восстановление кровотока в стволе мозга, базальных ганглиях и таламусе в течение 5 мин при пробуждении из второй стадии сна. Во фронтальных отделах коры восстановление кровотока, соответствующего состоянию бодрствования, протекало в течение 15 мин [23].

Авторы [24] измеряли спектральную мощность и межрегиональную синхронизацию до и после сна в нескольких сетях мозга, связанных со сном: это сеть, работающая в режиме по умолчанию (DMN), сенсомоторная сеть, сеть гиппокампа и таламокортикальные сети. На основе данных ЭЭГ и фМРТ были выявлены три сценария региональной специфики при пробуждении:

1. Компоненты DMN оставались сходными как в состоянии перед сном, так и в состоянии пробуждения, что свидетельствует о быстром восстановлении связей DMN и самосознания в течение 6 мин после пробуждения. Наблюдалось аналогичное усиление связей между билатеральными гиппокампами, что подразумевает быстрое восстановление функций, связанных с памятью.

2. Отмечено выраженное снижение связности SMN (сенсомоторные сети) и спектральной мощности после сна, которое, по мнению авторов, указывает на эффект инерции сна.

3. Таламус существенно улучшил связь с неокортексом при сниженной спектральной мощности.

Целью нашей работы являлось исследование амплитудно-амплитудного взаимодействия тета- и альфа-ритмов между областями полушарий головного мозга при пробуждении с различной эффективностью выполнения когнитивного задания.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В исследованиях пробуждения из дневного сна с помощью бимануального психомоторного теста [9] из 83 испытуемых была выделена группа из 15 человек (14 женщин и 1 мужчина, возраст от 18 до 22 лет, все практически здоровые люди, правши), которые соответствовали критериям исключения, принятым

для данного исследования. Критериями отбора экспериментального материала для данной статьи служили: а) пробуждение из 2-й стадии дневного сна, длящейся не менее 1,5 мин; б) начало нажатий после пробуждения правой рукой; в) наличие как частичного, так и полного восстановления выполнения теста после эпизодов 2-й стадии сна непосредственно после пробуждения. Было отобрано 15 испытуемых, число исследуемых ситуаций варьировалось у них от 2 до 8. При частичном выполнении испытуемый нажимал на кнопку правой, а затем левой рукой от 7 до 9 раз, при полном — по 10 раз. Все исследуемые были ознакомлены с процедурой проведения эксперимента и дали письменное согласие на участие в нем.

*Процедура эксперимента.* Испытуемый находился на кушетке в затемненном, звукоизолируемом помещении с кондиционером.

Испытуемым предлагалось нажимать указательными пальцами обеих рук по 10 раз попеременно. Если они заснули, а затем проснулись, нужно было продолжать прерванную деятельность. Эта психомоторная деятельность, в свою очередь, продолжалась до засыпания. При самопроизвольных пробуждениях испытуемый возобновлял выполнение теста. В силу того, что задание носило монотонный характер, а перед испытуемым стояла задача нажимать на кнопки, происходило чередование засыпаний и самопроизвольных пробуждений. В продолжение всего опыта записывали ЭЭГ от 19 хлорсеребряных электродов (схема расположения 10–20, референтные электроды — на мастоидах, сопротивление до 5 КОм, частота дискретизации 1000 Гц, полоса пропускания усилителя 0,5–40 Гц), а также электрокулограмму и механограмму нажатий.

*Анализ данных.* Анализировали 2 последовательных отрезка ЭЭГ по 4 с, непосредственно предшествовавших началу нажатий после пробуждений из 2-й стадии сна, — по отдельности в ситуациях неполного и полного восстановления выполнения теста. Оценка амплитудных характеристик ЭЭГ по выделенным отрезкам осуществляли с использованием непрерывного вейвлет-преобразования на основе «материнского» комплексного Morlet-вейвлета (Matlab 78.01). Карты распределения значений модуля коэффициента вейвлет-преобразования (КВП) строили в полосе 0,5–40 Гц с шагом 0,5 Гц и разрешением по времени 0,01 с. Для каждого испытуемого КВП усредняли по числу его пробуждений в эксперименте. Далее проводили усреднение КВП в частотных диапазонах тета (4–7,5 Гц) и альфа (8–13 Гц).

*Статистическая обработка данных.* Мерой амплитудно-амплитудного взаимодействия исследуемых ритмов ЭЭГ между отведениями выбирали коэффициент корреляции Кендалла (КК). Вычисляли его по всем парам отведений ЭЭГ. Например, для определения силы взаимодействия между амплитудной характеристикой тета-ритма в отведении F7 и амплитудной характеристикой альфа-ритма отведения T5 брали соответствующие пары значений КВП по каждому испытуемому и между ними вычисляли КК ( $n = 15$ ). Статистически значимые КК ( $p < 0,05$ ) сопоставляли в ситуациях неполного и полного восстановления выполнения психомоторного теста. При этом рассматривали внутриполушарные и межполушарные корреляционные связи по отдельности. Статистическая обработка осуществлялась с помощью пакета программ «SPSS, v.12».

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучение связей областей полушарий мозга по паре тета- и альфа-ритмов при когнитивном пробуждении показало существенные различия в ситуациях с полным и неполным восстановлением деятельности.

Когнитивное пробуждение с последующим полным восстановлением деятельности (по 10 нажатий и правой и левой рукой) сопровождалось большим числом связей левой передневисочной (отведение F7) области с 10 областями, а также левой средней височной области (отведение T3) с 6 областями как внутри полушария, так и между полушариями. Симметричные правая передневисочная и правая средневисочная области демонстрировали по 3 связи с изучаемыми регионами отведений (рис. 1). Остальные области полушарий (не представленные на рисунке) имели от 0 до 3 межрегиональных связей. Таким образом, межполушарная асимметрия изучаемых параметров формируется за счет количества связей в височных областях полушарий при полном восстановлении деятельности после пробуждения.

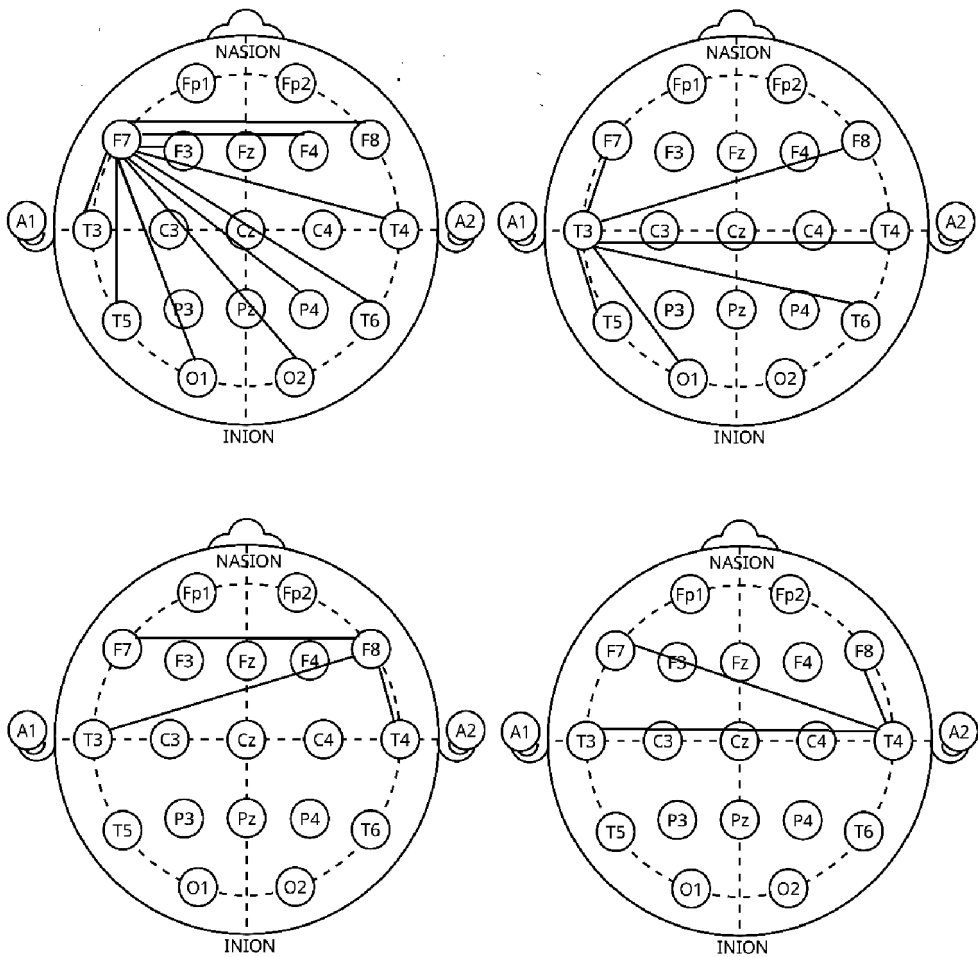
Неполное восстановление деятельности (от 7 до 9 нажатий на кнопки) при пробуждении выявило большое число регионов коры полушарий, которые демонстрировали связи по изучаемому параметру как с регионами внутри полушария, так и между полушариями. Межполушарные различия наблюдались в средних и задних височных областях полушарий. Правая средневисочная область полушария (T4) связана с 8 другими областями, левая – с 4. Левая задневисочная область (T5) объединяется с 9 регионами, а правая – с 5 (рис. 2).

В целом можно говорить о более сложной и обширной картине связей областей полушарий мозга при неполном восстановлении деятельности по сравнению с полным при пробуждении.

Отдельно рассматривались внутрислошарные связи областей по взаимодействию (паре) тета–альфа-ритмов. Наибольшее число связей (4 связи) наблюдалось в передневисочной области (F7) левого полушария во время когнитивного пробуждения с последующим полным восстановлением деятельности. При неполном когнитивном пробуждении наибольшее число внутрислошарных связей левого полушария отмечено в задневисочной (T5) и лобной (F3) областях (5 связей) и 4 связи в затылочной области (O1). По 4 связи наблюдалось в средневисочной (T4) и затылочной (O2) областях правого полушария.

Изучение внутрислошарных связей регионов показало большее их число при неполном пробуждении по сравнению с полным. Изучение связей областей с контралатеральным полушарием по взаимодействию тета–альфа-ритмов показало, что неполное пробуждение характеризуется большим числом связей областей по сравнению с полным. Наибольшее число связей (по 4) выявлено в передневисочной (F8), средневисочной (T4) и задневисочной (T5) областях.

Таким образом, показано наличие большего числа связей областей по паре тета-альфа-ритмов как внутри полушарий, так и между ними при неполном когнитивном пробуждении по сравнению с полным пробуждением. Наибольшее число связей обнаружено в лобных, височных и затылочных областях полушарий при неполном восстановлении деятельности после пробуждения. Полное пробуждение протекало на фоне большого числа связей в левой височной области.

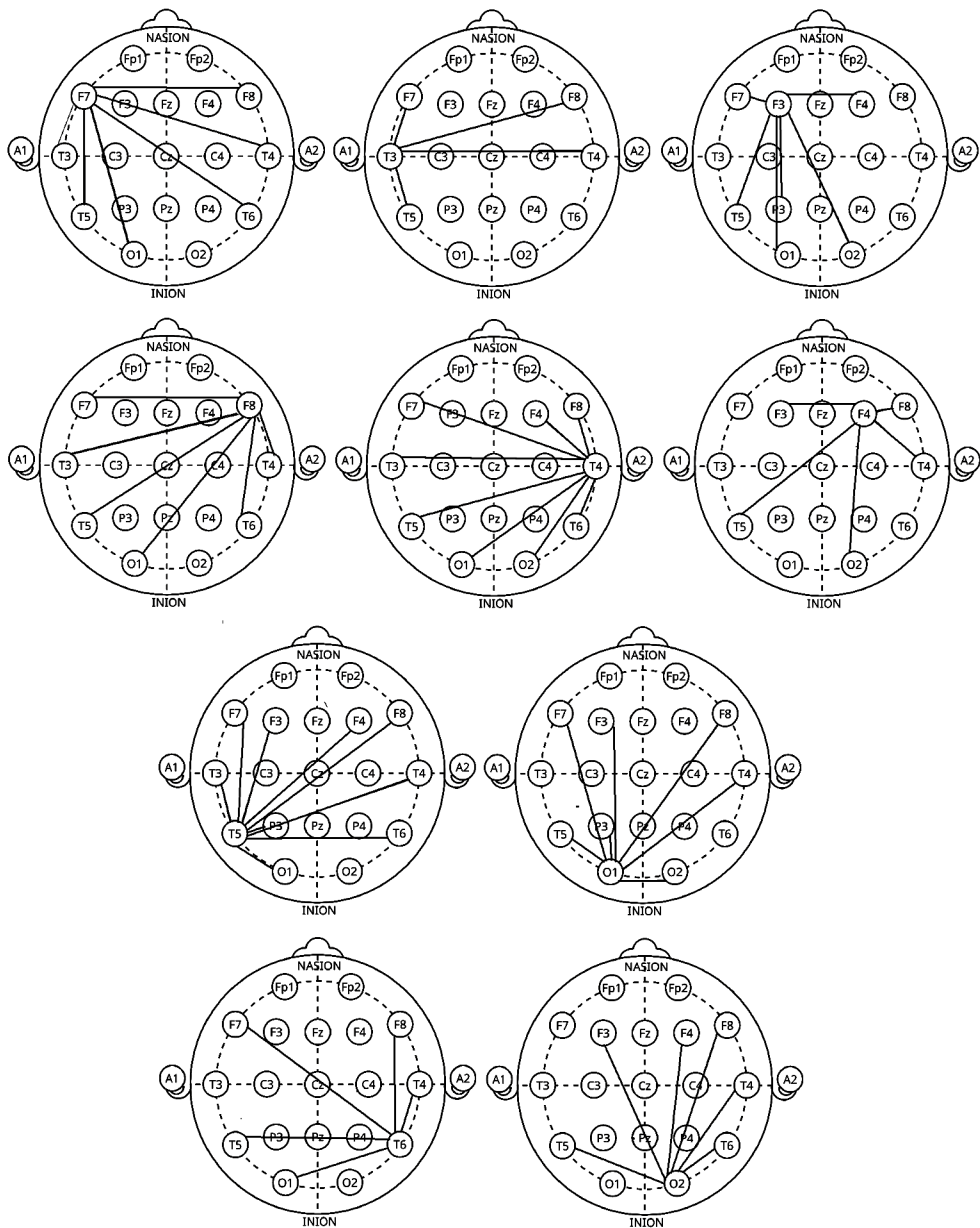


**Рис. 1.** Связи областей полушарий мозга по паре альфа–тета-ритмов при пробуждении с полным восстановлением деятельности (отведения F7, T3, F8 и T4)

**Fig. 1.** Connections between areas of the brain hemispheres in a pair of alpha-theta rhythms upon awakening with full restoration of activity (leads F7, T3, F8 and T4)

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Известно, что в процесс пробуждения вовлечены многие структуры мозга: ретикулярная формация, гиппокамп, лимбическая система, таламус, гипоталамус, а также кора больших полушарий [24, 25]. Обнаруженные в нашей работе связи областей коры по тета- и альфа-ритмам, вероятно, отражают активность ряда этих структур в контексте взаимодействия таламокортикальной и кортико-гиппокампальной систем. При этом используемый в нашей работе метод регистрации ЭЭГ, безусловно, не позволяет конкретизировать структуру корково-подкорковой системы, участвующую в процессе пробуждения. Исследование связей между



**Рис. 2.** Связи областей полушарий мозга по паре альфа–тета-ритмов при пробуждении с неполным восстановлением деятельности (отведения F7, T3, F3, F8, T4, F4, T5, O1, T6 и O2)

**Fig. 2.** Connections between areas of the brain hemispheres by a pair of alpha-theta rhythms upon awakening with incomplete recovery of activity (leads F7, T3, F3, F8, T4, F4, T5, O1, T6 and O2)

областями полушарий при полном и неполном восстановлении деятельности после пробуждения выявило различия как внутри полушарий, так и в связях с контралатеральным полушарием. Неполное пробуждение и, соответственно, неэффективная последующая деятельность происходят на фоне большего объединения регионов коры полушарий по сравнению с состоянием полной готовности к выполнению задания. Этот факт свидетельствует, по нашему мнению, о широком распространении процесса взаимодействия каких-либо структур таламокортикальной и кортико-гиппокампальной систем мозга. При этом мы наблюдали приблизительно одинаковый набор связей в большинстве симметричных регионов коры, за исключением височных. Мы предполагаем в данном случае, что в условиях большего влияния инерции сна [26] отсутствует избирательная готовность мозговых структур к выполнению задания.

Для более ясного представления полученных данных мы сочли возможным привести численное выражение внутри и межполушарных связей изучаемых ритмов ЭЭГ с разной эффективностью восстановления деятельности (табл. 1 и 2).

**Таблица 1.** Число межполушарных и внутриполушарных связей областей по взаимодействию тета–альфа–ритмов левого и правого полушарий мозга при когнитивном пробуждении с последующим неполным восстановлением деятельности

**Table 1.** Number of inter- and intrahemispheric connections between the theta–alpha rhythms of the left and right hemispheres during cognitive awakening with subsequent incomplete activity restoration

Отведения	Межполушарные связи	Внутриполушарные связи	Отведения	Межполушарные связи	Внутриполушарные связи
F3	2	5	F4	2	3
F7	3	3	F8	3	2
T3	3	1	<b>T4</b>	<b>4</b>	<b>4</b>
<b>T5</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	T6	2	3
O1	3	4	O2	2	4
Всего	15	18		13	16

*Примечание.* Полу жирным шрифтом выделены области с наибольшим числом связей регионов по паре тета–альфа–ритмов.

*Note.* Regions with the highest number of theta–alpha rhythm pair connections are highlighted in bold.

Пробуждение с полным восстановлением выполнения психомоторного теста происходит на фоне существенно меньшего объединения регионов коры. При этом выявлено асимметричное распределение числа внутриполушарных связей областей полушарий. Отмечено существенное их преобладание в височных областях левого полушария.

**Таблица 2.** Число межполушарных и внутриполушарных связей областей по взаимодействию тета–альфа-ритмов левого и правого полушарий мозга при когнитивном пробуждении с последующим полным восстановлением деятельности

**Table 2.** Number of inter- and intrahemispheric connections between the theta–alpha rhythms of the left and right hemispheres of the brain during cognitive awakening with subsequent full activity restoration

Отведения	Межполушарные связи	Внутриполушарные связи	Отведения	Межполушарные связи	Внутриполушарные связи
F3	1	1	F4	2	1
<b>F7</b>	<b>6</b>	<b>4</b>	F8	2	1
<b>T3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	T4	2	1
T5	0	2	T6	2	0
O1	0	2	O2	1	0
Всего	10	12		9	3

*Примечание.* Полужирным шрифтом выделены области с наибольшим числом связей регионов по паре тета–альфа-ритмов.

*Note.* Regions with the highest number of theta–alpha rhythm pair connections are highlighted in bold.

Исследования [23] показали, что пробуждение из второй стадии сна сопровождается восстановлением кровотока вначале в стволе, таламусе и базальных ганглиях, а затем в неокортексе. Опираясь на эти данные, можно предположить, что менее эффективная деятельность происходит на ранних стадиях пробуждения, когда в этом процессе задействовано большое число структур мозга, тогда как полное восстановление психомоторного теста приходится на поздние стадии, когда пробуждение в большей степени носит «корковый» характер.

Связи областей с регионами контралатерального полушария при обоих видах пробуждения имеют сходные количественные характеристики в полушариях: при неполном пробуждении в левом полушарии 15, а в правом – 13 связей, а при полном – в левом – 10, а в правом – 9 связей (табл. 1 и 2). По всей видимости, именно «длинные» связи и формируют процесс пробуждения. В пользу этой гипотезы свидетельствует работа Hilditch с соавт., в которой показана значимость дальнейшей сетевой связи в мозге для пробуждения [21].

Наибольшее число связей при полном когнитивном пробуждении выявлено в височных областях левого полушария, а при неполном – в лобных, височных и затылочных областях обоих полушарий. При обоих видах пробуждения выявлено участие височных долей полушарий, которые наряду с гиппокампом играют ключевую роль в формировании долговременной памяти. Данный результат в определенной мере согласуется с гипотезой Дорохова об извлечении инструкции из памяти в процессе пробуждения и восстановления деятельности после эпизода сна [9].

Неполное пробуждение, как мы уже отмечали, сопровождается наличием связей лобных областей. В работе [27] описывается факт увеличения гемодинамической активации в правой префронтальной коре перед пробуждением.

Показан различный вклад межполушарных (длинных) и внутриполушарных (более коротких) связей альфа- и тета-ритмов в процесс пробуждения. При полном пробуждении (полноценное восстановление активности) выявлено приблизительно одинаковое количество как межполушарных, так и внутриполушарных связей ритмов ЭЭГ. Неполное пробуждение характеризовалось приблизительно сходным числом межполушарных связей и преобладающим количеством внутриполушарных связей левого полушария по сравнению с правым.

Таким образом, в нашем предварительном исследовании было показано различающееся распространение по коре больших полушарий, вероятное взаимодействие структур таламокортикальной и кортико-гиппокампальной корково-подкорковых систем мозга при разной степени пробуждения.

Как мы уже писали выше, ритмы ЭЭГ отражают работу определенных корково-подкорковых структур [10–12, 14–16]. Используемый нами метод регистрации ЭЭГ, безусловно, не позволяет видеть напрямую, какие структуры указанных корково-подкорковых систем принимают участие в процессе пробуждения. При этом мы не можем полностью исключить влияние подкорковых структур на процессы, протекающие в коре. Поэтому наши выводы носят предположительный характер.

Используемый методический подход и полученные результаты расширяют представление о мозговых процессах, на фоне которых происходит полное или неполное восстановление деятельности после пробуждения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Когнитивное пробуждение с последующим восстановлением деятельности разной эффективности сопровождалось различиями в количестве связей областей мозга как внутри полушарий, так и связях с контралатеральным полушарием. Пробуждение с неполным восстановлением деятельности протекало на фоне большого числа как внутриполушарных, так и межполушарных связей по сравнению с пробуждением с полным восстановлением. Наибольшее число связей при полном когнитивном пробуждении выявлено в височных областях левого полушария, а при неполном — в лобных, височных и затылочных областях обоих полушарий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Horton C.L. Consciousness across sleep and wake: discontinuity and continuity of memory experiences as a reflection of consolidation processes. *Front. Psychiatr.* 2017. Vol. 8. 159. <https://doi.org/10.3389/fpsyt.2017.00159>
2. Windt J.M. Consciousness in sleep: how findings from sleep and dream research challenge our understanding of sleep, waking, and consciousness. *Philos. Compass.* 2020. Vol. 15. No. 4. e12661. <https://doi.org/10.1111/phc3.12661>
3. Liu Y., Li Z., Bai Y. Frontal and parietal lobes play crucial roles in understanding the disorder of consciousness: A perspective from electroencephalogram studies. *Front. Neurosci.* 2023. Vol. 16. 1024278. <https://doi.org/10.3389/fnins.2022.1024278>

4. Voss U. Change in EEG pre and post awakening. *Int. Rev. Neurobiol.* 2010. Vol. 93. Pp. 23–56. [https://doi.org/10.1016/S0074-7742\(10\)93002-X](https://doi.org/10.1016/S0074-7742(10)93002-X)
5. Ballanti S., Campagnini S., Liuzzi P. et al. EEG-based methods for recovery prognosis of patients with disorders of consciousness: A systematic review. *Clin. Neurophysiol.* 2022. Vol. 144. Pp. 98–114. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2022.09.017>
6. Wutzl B., Golaszewski S.M., Leibnitz K. et al. Narrative Review: Quantitative EEG in Disorders of Consciousness. *Brain Sci.* 2021. Vol. 11. No. 6. Pp. 697–737. <https://doi.org/10.3390/brainsci11060697>
7. Fingelkurts A.A., Fingelkurts A.A., Bagnato S. et al. EEG oscillatory states as neuro-phenomenology of consciousness as revealed from patients in vegetative and minimally conscious states. *Consciousn. Cognit.* 2012. Vol. 21. No. 1. Pp. 149–169. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2011.10.004>
8. Яковенко И.А., Петренко Н.Е., Черемушкин Е.А. и др. Динамика взаимодействия ритмов ЭЭГ, предшествующая моменту пробуждения с последующим восстановлением деятельности после кратковременных эпизодов засыпаний. *Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова.* 2022. Т. 108. № 4. С. 443–454. <https://doi.org/10.31857/S0869813922040094>
9. Дорохов В.Б. Альфа-веретена и К-комплекс – фазические активационные паттерны при спонтанном восстановлении нарушений психомоторной деятельности на разных стадиях дремоты. *Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова.* 2003. Т. 53. № 4. С. 502–511.
10. Steriade M. Grouping of brain rhythms in cortico-thalamic systems. *Neuroscience.* 2006. Vol. 137. No. 4. Pp. 1087–1106. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2005.10.029>
11. Lopes da Silva F.H., Vos J.E., Mooibroek J., van Rotterdam A. Relative contributions of intracortical and thalamo-cortical processes in the generation of alpha rhythms, revealed by partial coherence analysis. *Electroencephal. Clin. Neurophysiol.* 1980. Vol. 50. Nos. 5–6. Pp. 449–456. [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(80\)90011-5](https://doi.org/10.1016/0013-4694(80)90011-5)
12. Lopes da Silva F.H. Neural mechanisms underlying brain waves: from neural membranes to networks. *Electroencephal. Clin. Neurophysiol.* 1991. Vol. 79. No. 2. Pp. 81–93. [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(91\)90044-5](https://doi.org/10.1016/0013-4694(91)90044-5)
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. Vol. 2. Pp. 169–192. <https://doi.org/10.14311/NNW.2011.21.011>
14. Dos Santos Lima G.Z., Lobao-Soares B., Corso G. et al. Hippocampal and cortical communication around micro-arousals in slow-wave sleep. *Sci. Rep.* 2019. Vol. 9. No. 1. 5876. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42100-5>
15. Lisman J.E., Jensen O. The theta and gamma neural code. *Neuron.* 2013. Vol. 77. Pp. 1002–1016. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2013.03.007>

16. Cai Z.-J. The limbic-reticular coupling theory of memory processing in the brain and its greater compatibility over other theories. *Dement. Neuropsychol.* 2018. Vol. 12. No. 2. Pp. 105–113. <https://doi.org/10.1590/1980-57642018dn12-020002>
17. Knyazev G.G., Savostyanov A.N., Bocharov A.V. et al. Cross-Frequency Coupling in Developmental Perspective. *Front. Human Neurosci.* 2019. Vol. 13. 158. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00158>
18. Canolty R.T., Knight R.T. The functional role of cross-frequency coupling. *Trends Cogn. Sci.* 2010. Vol. 14. No. 11. Pp. 506–517. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2010.09.001>
19. Morillas-Romero A., Tortella-Feliu M., Bornas X. et al. Spontaneous EEG theta/beta ratio and delta–beta coupling in relation to attentional network functioning and self-reported attentional control. *Cogn. Affect. Behav. Neurosci.* 2015. Vol. 15. No. 3. Pp. 598–606. <https://doi.org/10.3758/s13415-015-0351-x>
20. Яковенко И.А., Петренко Н.Е., Черемушкин Е.А. и др. Межполушарные различия связей между ритмами ЭЭГ при полном и неполном пробуждении. *Психологический журнал.* 2024. Т. 45. № 6. С. 73–84. <https://doi.org/10.31857/S0205959224060078>
21. Hilditch C.J., Bansal K., Chachad R. et al. Crossmark: Check for Updates Network. *Neuroscience.* 2023. Vol. 7. No. 1. Pp. 102–121. [https://doi.org/10.1162/netn\\_a\\_00272](https://doi.org/10.1162/netn_a_00272)
22. Vallat R., Meunier D., Nicolas A. et al. Brain functional connectivity upon awakening from sleep predicts interindividual differences in dream recall frequency. *Sleep.* 2020. Vol. 43. No. 12. zsaal16. <https://doi.org/10.1093/sleep/zsaa116>
23. Balkin T.J., Braun A.R., Wesensten N.J. et al. The process of awakening: A PET study of regional brain activity patterns mediating the re-establishment of alertness and consciousness. *Brain.* 2002. Vol. 125. No. 10. Pp. 2308–2319. <https://doi.org/10.1093/brain/awf22821>
24. Tsai P.-J., Chen S.C.-J., Hsu C.-Y. et al. Local awakening: regional reorganizations of brain oscillations after sleep. *Neuroimage.* 2014. Vol. 102. Pt. 2. Pp. 894–903. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2014.07.032>
25. Украинцева Ю.В., Соловьева А.К. Феномен пробуждения от сна. Нейрофизиологические и вегетативные процессы, его обеспечивающие. *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. Спецвыпуски.* 2023. Т. 123. № 5-2. С. 21–27. <https://doi.org/10.17116/jnevro202312305221>
26. 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. Vol. 184. Pp. 266–278. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.09.033>
27. Aritake S., Higuchi S., Suzuki H. et al. Increased cerebral blood flow in the right frontal lobe area during sleep precedes self-awakening in humans. *BMC Neurosci.* 2012. Vol. 13. 153. <https://doi.org/10.1186/1471-2202-13-153>

## REFERENCES

1. Horton C.L. Consciousness across sleep and wake: discontinuity and continuity of memory experiences as a reflection of consolidation processes. *Front. Psychiatry*. 2017;**8**:159. <https://doi.org/10.3389/fpsyt.2017.00159>
2. Windt J.M. Consciousness in sleep: how findings from sleep and dream research challenge our understanding of sleep, waking, and consciousness. *Philos. Compass*. 2020;**15**(4):e12661. <https://doi.org/10.1111/phc3.12661>
3. Liu Y., Li Z., Bai Y. Frontal and parietal lobes play crucial roles in understanding the disorder of consciousness: a perspective from electroencephalogram studies. *Front. Neurosci*. 2023;**16**:1024278. <https://doi.org/10.3389/fnins.2022.1024278>
4. Voss U. Change in EEG pre and post awakening. *Int. Rev. Neurobiol*. 2010;**93**:23–56. [https://doi.org/10.1016/S0074-7742\(10\)93002-X](https://doi.org/10.1016/S0074-7742(10)93002-X)
5. Ballanti S., Campagnini S., Liuzzi P. et al. EEG-based methods for recovery prognosis of patients with disorders of consciousness: a systematic review. *Clin. Neurophysiol*. 2022;**144**:98–114. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2022.09.017>
6. Wutzl B., Golaszewski S.M., Leibnitz K. et al. Narrative review: quantitative EEG in disorders of consciousness. *Brain Sci*. 2021;**11**(6):697–737. <https://doi.org/10.3390/brainsci11060697>
7. Fingelkurts A.A., Fingelkurts A.A., Bagnato S. et al. EEG oscillatory states as neuro-phenomenology of consciousness as revealed from patients in vegetative and minimally conscious states. *Conscious. Cogn*. 2012;**21**(1):149–169. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2011.10.004>
8. Yakovenko I.A., Petrenko N.E., Cheremushkin E.A. et al. Dinamika vzaimodeystviya ritmov EEG, predshestvuyushchaya momentu probuzhdeniya s posleduyushchim vosstanovleniyem deyatelnosti posle kratkovremennykh epizodov zasypaniy [Dynamics of the interaction of EEG rhythms preceding the moment of awakening, followed by the restoration of activity after short-term episodes of falling asleep]. *Rossiiskii fiziologicheskii zhurnal imeni I.M. Sechenova = Russian Journal of Physiology*. 2022;**108**(4):443–454. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0869813922040094>
9. Dorokhov V.B. Alfa-veretena i K-kompleks – fazicheskiye aktivatsionnyye patterny pri spontannom vosstanovlenii narusheniy psikhomotornoy deyatelnosti na raznykh stadiyakh dremoty [Alpha-spindles and the K-complex: phasic activation patterns in spontaneous recovery of psychomotor disorders at different stages of drowsiness]. *Zhurnal vysshey nervnoy deyatelnosti im. I.P. Pavlova = I.P. Pavlov Journal of Higher Nervous Activity*. 2003;**53**(4):502–511. (In Russ.)
10. Steriade M. Grouping of brain rhythms in cortico-thalamic systems. *Neuroscience*. 2006;**137**(4):1087–1106. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2005.10.029>
11. Lopes da Silva F.H., Vos J.E., Mooibroek J. et al. Relative contributions of intracortical and thalamo-cortical processes in the generation of alpha rhythms, revealed by partial coherence analysis. *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol*. 1980;**50**(5-6):449–456. [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(80\)90011-5](https://doi.org/10.1016/0013-4694(80)90011-5)
12. Lopes da Silva F.H. Neural mechanisms underlying brain waves: from neural membranes to networks. *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol*. 1991;**79**(2):81–93. [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(91\)90044-5](https://doi.org/10.1016/0013-4694(91)90044-5)

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 Netw. World.* 2011;**21**(2):169–192.  
<https://doi.org/10.14311/NNW.2011.21.011>
14. Dos Santos Lima G.Z., Lobao-Soares B., Corso G. et al. Hippocampal and cortical communication around micro-arousals in slow-wave sleep. *Sci. Rep.* 2019;**9**(1):5876.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-019-42100-5>
15. Lisman J.E., Jensen O. The theta and gamma neural code. *Neuron.* 2013;**77**:1002–1016. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2013.03.007>
16. Cai Z.-J. The limbic-reticular coupling theory of memory processing in the brain and its greater compatibility over other theories. *Dement. Neuropsychol.* 2018;**12**(2):105–113. <https://doi.org/10.1590/1980-57642018dn12-020002>
17. Knyazev G.G., Savostyanov A.N., Bocharov A.V. et al. Cross-frequency coupling in developmental perspective. *Front. Hum. Neurosci.* 2019;**13**:158.  
<https://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00158>
18. Canolty R.T., Knight R.T. The functional role of cross-frequency coupling. *Trends Cogn. Sci.* 2010;**14**(11):506–517. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2010.09.001>
19. Morillas-Romero A., Tortella-Feliu M., Bornas X. et al. Spontaneous EEG theta/beta ratio and delta-beta coupling in relation to attentional network functioning and self-reported attentional control. *Cogn. Affect. Behav. Neurosci.* 2015;**15**(3):598–606.  
<https://doi.org/10.3758/s13415-015-0351-x>
20. Yakovenko I.A., Petrenko N.E., Cheremushkin E.A. et al. Mezhpolusharnyye razlichiya svyazey mezhdru ritmami EEG pri polnom i nepolnom probuzhdenii [Hemispheric Differences in the Connections Between EEG Rhythms During Full and Incomplete Awakening]. *Psikhologicheskii zhurnal = Psychological Journal.* 2024;**45**(6):73–84. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0205959224060078>
21. Hilditch C.J., Bansal K., Chachad R. et al. Crossmark: check for updates network. *Netw. Neurosci.* 2023;**7**(1):102–121. [https://doi.org/10.1162/netn\\_a\\_00272](https://doi.org/10.1162/netn_a_00272)
22. Vallat R., Meunier D., Nicolas A., Ruby P. Brain functional connectivity upon awakening from sleep predicts interindividual differences in dream recall frequency. *Sleep.* 2020;**43**(12):zsaa116. <https://doi.org/10.1093/sleep/zsaa116>
23. Balkin T.J., Braun A.R., Wesensten N.J. et al. The process of awakening: a PET study of regional brain activity patterns mediating the re-establishment of alertness and consciousness. *Brain.* 2002;**125**(10):2308–2319.  
<https://doi.org/10.1093/brain/awf228>
24. Tsai P.-J., Chen S.C.-J., Hsu C.-Y. et al. Local awakening: regional reorganizations of brain oscillations after sleep. *Neuroimage.* 2014;**102**(2):894–903.  
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2014.07.032>
25. Ukraintseva Yu.V., Solovyova A.K. Fenomen probuzhdeniya ot sna. Neyrofiziologicheskiye i vegetativnyye protsessy, ego obespechivayushchiye [The phenomenon of awakening from sleep and underlying neurophysiological and autonomic mechanisms]. *Zhurnal nevrologii i psikiatrii im. S.S. Korsakova = S.S. Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry.* 2023;**123**(5-2):21–27. (In Russ.)  
<https://doi.org/10.17116/jnevro202312305221>

26. Vallat R., Meunier D., Nicolas A. et al. Hard to wake up? The cerebral correlates of sleep inertia assessed using combined behavioral, EEG and fMRI measures. *Neuro-image*. 2019; **184**:266–278. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.09.033>
27. Aritake S., Higuchi S., Suzuki H. et al. Increased cerebral blood flow in the right frontal lobe area during sleep precedes self-awakening in humans. *BMC Neurosci.* 2012; **13**:153. <https://doi.org/10.1186/1471-2202-13-153>

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Яковенко Ирина Анатольевна — канд. биол. наук; ст. науч. сотр.,  
Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН,  
Москва, Российская Федерация  
E-mail: irinayakovenko@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-0391-7266>

Черемушкин Евгений Алексеевич — канд. биол. наук; ст. науч. сотр.,  
Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН,  
Москва, Российская Федерация  
E-mail: ivnd@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-6902-8077>

Поступила в редакцию 16.09.2025  
После доработки 27.10.2025  
Принята к публикации 28.10.2025

## ABOUT THE AUTHORS

Yakovenko, Irina A. — Cand. Sc. (Biology); Senior Research Officer,  
Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology of the Russian Academy of Sciences,  
Moscow, Russian Federation  
E-mail: irinayakovenko@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-0391-7266>

Cheryomushkin, Evgeny A. — Cand. Sc. (Biology); Senior Research Officer,  
Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology of the Russian Academy of Sciences,  
Moscow, Russian Federation  
E-mail: ivnd@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-6902-8077>

Received September 16, 2025  
Revised October 27, 2025  
Accepted October 28, 2025