



УДК 612.821.6

EDN JLQIDZ

<https://doi.org/10.33910/2687-1270-2023-4-2-244-257>

## Влияние функционального состояния человека на характеристики ЭЭГ при возобновлении психомоторной деятельности во время краткосрочного пробуждения из дневного сна

И. А. Яковенко<sup>1</sup>, Н. Е. Петренко<sup>1</sup>, Е. А. Черемушкин<sup>✉1</sup>, В. Б. Дорохов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН,  
117485, Россия, г. Москва, ул. Бутлерова, д. 5а, стр. 1

### Сведения об авторах

Ирина Анатольевна Яковенко, ORCID: 0000-0002-0391-7266, e-mail: [irinayakovenko@mail.ru](mailto:irinayakovenko@mail.ru)

Надежда Евгеньевна Петренко, ORCID: 0000-0003-3639-8957, e-mail: [xhthon@yandex.ru](mailto:xhthon@yandex.ru)

Евгений Алексеевич Черемушкин, ORCID: 0000-0001-6902-8077, e-mail: [ivnd@mail.ru](mailto:ivnd@mail.ru)

Владимир Борисович Дорохов, ORCID: 0000-0003-3533-9496, [vbdorokhov@mail.ru](mailto:vbdorokhov@mail.ru)

**Для цитирования:** Яковенко, И. А., Петренко, Н. Е., Черемушкин, Е. А., Дорохов, В. Б. (2023) Влияние функционального состояния человека на характеристики ЭЭГ при возобновлении психомоторной деятельности во время краткосрочного пробуждения из дневного сна. *Интегративная физиология*, т. 4, № 2, с. 244–257. <https://doi.org/10.33910/2687-1270-2023-4-2-244-257> EDN JLQIDZ

**Получена** 19 мая 2023; прошла рецензирование 26 июня 2023; принята 29 июня 2023.

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках Государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации на 2021–2023 гг.

**Права:** © И. А. Яковенко, Н. Е. Петренко, Е. А. Черемушкин, В. Б. Дорохов (2023). Опубликовано Российским государственным педагогическим университетом им. А. И. Герцена. Открытый доступ на условиях лицензии CC BY-NC 4.0.

**Аннотация.** Исследования нейрофизиологических основ восстановления деятельности после сна являются актуальными в связи с тем, что они позволяют объективно оценивать ее эффективность в этих условиях. В эксперименте использовали непрерывно-дискретный психомоторный тест. Его выполнение у испытуемых с разным функциональным состоянием, которое определяли перед опытом по тесту САН, сопровождалось различающейся динамикой взаимодействия ритмов ЭЭГ на 20-секундном интервале записи при возобновлении деятельности после эпизода дневного сна. На трех выделенных в этом интервале с помощью факторного анализа временных отрезках испытуемые, которые были в лучшем функциональном состоянии перед опытом, продемонстрировали существенно больше связей ритмов по сравнению с испытуемыми в худшем состоянии. В целом у первых отмечены 22 связи ритмов, тогда как у вторых — 12. Различия заключались также в скорости появления связей. Группа с хорошим самочувствием быстрее формировала связи медленных ритмов с бета- (1-й временной интервал — 1–7 с после восстановления деятельности) и с гамма-ритмом (2-й интервал — 8–10 с). Это может свидетельствовать о большей активации мозговых структур при выполнении теста. Группа со сниженным самочувствием эти же связи демонстрировала с отставанием в один временной интервал. Количество связей медленных ритмов с быстрыми в группе с хорошим самочувствием было существенно больше (12 против 3). В этой же группе испытуемых в интервале 11–20 с возникали связи дельта-ритма с альфа2- и тета-ритмом. Исходя из этого можно сделать заключение о том, что испытуемые с хорошим самочувствием имеют иную нейрофизиологическую основу для выполнения психомоторного теста после пробуждения.

**Ключевые слова:** функциональное состояние, дневной сон, пробуждение, психомоторная деятельность, межполушарная асимметрия, амплитудно-амплитудное взаимодействие ритмов ЭЭГ

# The effect of a person's functional state on EEG when resuming psychomotor activity during a short-term awakening from daytime sleep

I. A. Yakovenko<sup>1</sup>, N. E. Petrenko<sup>1</sup>, E. A. Cheremushkin<sup>✉1</sup>, V. B. Dorokhov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology, Russian Academy of Sciences, 5a Structure 1 Butlerova Str., Moscow 117485, Russia

## Authors

Irina A. Yakovenko, ORCID: 0000-0002-0391-7266, e-mail: irinayakovenko@mail.ru

Nadezhda E. Petrenko, ORCID: 0000-0003-3639-8957, e-mail: xhthon@yandex.ru

Evgeny A. Cheremushkin, ORCID: 0000-0001-6902-8077, e-mail: ivnd@mail.ru

Vladimir B. Dorokhov, ORCID: 0000-0003-3533-9496, e-mail: vbdorokhov@mail.ru

**For citation:** Yakovenko, I. A., Petrenko, N. E., Cheremushkin, E. A., Dorokhov, V. B. (2023) The effect of a person's functional state on EEG when resuming psychomotor activity during a short-term awakening from daytime sleep.

*Integrative Physiology*, vol. 4, no. 2, pp. 244–257. <https://doi.org/10.33910/2687-1270-2023-4-2-244-257> EDN JLQIDZ

**Received** 19 May 2023; reviewed 26 June 2023; accepted 29 June 2023.

**Funding:** The study was carried out as part of the state-commissioned assignment of Ministry of Education and Science of the Russian Federation for 2021–2023.

**Copyright:** © I. A. Yakovenko, N. E. Petrenko, E. A. Cheremushkin, V. B. Dorokhov (2023). Published by Herzen State Pedagogical University of Russia. Open access under [CC BY-NC License 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

**Abstract.** Investigation of the neurophysiological foundations of activity recovery after sleep are relevant due to the fact that they allow an objective assessment of activity effectiveness in these conditions. A continuous-discrete psychomotor test was used in the experiment. The functional state of subjects was determined before the experiment by the SAN test (assessment of health, activity and mood). The psychomotor test produced different dynamics of the coupling of EEG rhythms at a 20-second recording interval when resuming activity after an episode of daytime sleep. Subjects with good general condition demonstrated significantly more rhythm connections on three time segments selected in this interval using factor analysis compared to subjects with poorer general condition. In general, the former have 22 rhythm connections, while the latter have 12. The differences were in the speed of the appearance of connections. The group with better general condition formed faster connections of slow rhythms with beta rhythm (interval 1–7 s after the restoration of activity) and gamma rhythm (interval 8–10 s). This may indicate a greater activation of brain structures during the test. The groups with poorer general condition demonstrated the same relationship with a lag in one time interval. The number of connections of slow rhythms with fast ones in the group with good general condition was significantly higher (12 vs. 3). The same group of subjects revealed connections of the delta rhythm with alpha2 and theta rhythms in the interval of 11–20 seconds.

**Keywords:** functional state, daytime sleep, awakening, psychomotor activity, hemispheric asymmetry, amplitude-amplitude coupling of EEG rhythms

## Введение

Восстановление деятельности после сна — достаточно важная тема для изучения. Она важна потому, что активность человека восстанавливается постепенно. Именно в этот период при переходе от сна к бодрствованию мы наблюдаем изменения уровня сознания. На постепенность восстановления деятельности влияет феномен инерции сна, проявляющийся во временном ухудшении работоспособности субъекта (Rutskova 2016). На практике эти исследования востребованы в тех областях, в которых человеку после непродолжительного сна необходимо оперативно принимать важные

решения: в медицинской, военной, космической сфере, менеджменте кризисов и катастроф.

Преимущественно в этом состоянии у субъектов анализируют поведенческие показатели возобновления деятельности, а именно — скорость и точность выполнения заданий (Rutskova 2016; Trotti 2017). В ряде работ исследуется биоэлектрическая активность и мозговой кровотока после сна — без когнитивной нагрузки (Hajak et al. 1994; Marzano et al. 2011). Исследования, использующие нейрофизиологические показатели при деятельности в условиях инерции сна, немногочисленны (Tassi et al. 2006; Vallat 2019). Показано, что предшествующая эксперименту со сном депривация испытуемых ухудша-

ет их когнитивные функции в состоянии инерции сна, и у них наблюдается усиление тета-ритма по сравнению с электроэнцефалограммой (ЭЭГ) перед опытом. При этом и у испытуемых с депривацией, и в контрольной группе альфа-ритм в исследуемом состоянии по сравнению с фоном усиливался (Tassi et al. 2006). В исследовании (Vallat 2019) также показано увеличение мощности альфа-ритма, при этом связность между отделами мозга снижалась.

Известно, что эффективность деятельности является показателем функционального состояния человека. В связи с этим возникает вопрос, может ли исходное функциональное состояние влиять на восстановление когнитивно-поведенческой активности после пробуждения?

Целью настоящей работы являлось исследование восстановления активности человека после пробуждения в процессе выполнения психомоторного теста. Перед нами стояла задача исследовать амплитудно-амплитудное взаимодействие (cross-frequency coupling) ритмов ЭЭГ после пробуждения.

### Методы исследования

Проведенная работа соответствовала этическим стандартам, разработанным в соответствии с Хельсинкской декларацией Всемирной медицинской ассоциации «Этические принципы проведения научных медицинских исследований с участием человека» с поправками 2000 г. и «Правилами клинической практики в Российской Федерации», утвержденными Приказом Минздрава РФ от 19.06.2003 г. № 266 и заключению локального этического комитета Института высшей нервной деятельности № 0.043 от 2019 г.

### Испытуемые

В эксперименте приняли участие 18 человек (12 женщин и шесть мужчин, возраст от 19 до 22 лет, все студенты, правши). Функциональное состояние испытуемых оценивали с помощью опросника САН (самочувствие, настроение, активность), который включает в себя три шкалы: самочувствие, активность, настроение. В работе был использован интегративный показатель САН. Его вычисляли по формуле  $i\text{САН} = C + A + H/3$ . В результате были получены две группы испытуемых: с высоким ( $M + m = 58,73 \pm 1,37$ ;  $n = 10$ , из них семь женщин и трое мужчин, возраст  $19,9 \pm 0,87$ ) и низким ( $M + m = 40,4 \pm 2,63$ ;  $n = 8$ , из них пять женщин и трое мужчин, возраст  $20,8 \pm 1,12$ ) САН.

### Процедура исследования

Время эксперимента: с 13.00 до 16.00. Продолжительность — от 55 мин до 1 ч (Yakovenko

et al. 2022). Также испытуемые заполняли дневник сна, Калифорнийскую шкалу сонливости и опросник САН. Во время эксперимента испытуемые располагались на кушетке в затемненной, звукоизолированной и проветриваемой камере. В помещении поддерживалась постоянная комфортная температура. В эксперименте использовали непрерывно-дискретный психомоторный тест, разработанный В. Б. Дороховым (Dorokhov et al. 2018). Обследуемые должны были считать «про себя» от 1 до 10. Одновременно при каждом отсчете они должны нажимать на кнопку, зафиксированную на указательном пальце, большим пальцем правой руки. Далее они продолжали считать «про себя» от 1 до 10, но уже без нажатий. Чередование счета с нажатиями и без нажатий продолжалось до тех пор, пока испытуемые не засыпали или не спали до конца опыта. В случае засыпания и последующего спонтанного пробуждения они должны были немедленно возобновить выполнение психомоторного теста. В инструкции особо подчеркивалось, что при просыпании надо сначала выполнять счет с нажатием на кнопку и только потом без нажатия.

Регистрировали ЭЭГ с поверхности головы от 17 электродов, расположенных по схеме 10–20% (F3, F4, F7, F8, Fz, C3, C4, Cz, T3, T4, P3, P4, Pz, T5, T6, O1, O2). Отведение ЭЭГ монополярное, референтный электрод — объединенный ушной. Параллельно с ЭЭГ регистрировали электроокулограмму (ЭОГ), электромиограмму (ЭМГ) и механограмму нажатия на кнопку. Для регистрации нажатий использовали пневматическую кнопку, чувствительную к силе нажатий. Одновременно с регистрацией механограммы нажатия на кнопку, регистрировали ЭМГ короткой мышцы, отводящей большой палец кисти правой руки (musculus abductor pollicis brevis). Регистрацию всех показателей проводили с помощью системы Neocortex-Pro («Neurobotics», Россия). Частота дискретизации — 250 Гц. Полоса пропускания частот: 0,5–70 Гц. ЭЭГ регистрировали с помощью шлема с хлорсеребряными электродами, с сопротивлением, не превышающим 5 КОм. Перед выполнением психомоторного теста в течение 5 мин записывали ЭЭГ испытуемого в состоянии спокойного бодрствования при закрытых глазах (Yakovenko et al. 2022).

### Анализ данных

В работу шли 20-секундные отрезки ЭЭГ после пробуждения во время возобновления выполнения задания. По механограмме (первое нажатие на кнопку) определяли момент начала

работы. В анализ вошли неполные, наиболее близкие к полноценным, отрезки выполнения деятельности, иначе говоря, от шести до девяти нажатий на кнопку. С помощью метода анализа вариационных кривых оценивали амплитудные изменения ЭЭГ. Производили фильтрацию отрезки ЭЭГ в диапазоне 0,5–40 Гц с шагом 0,5 Гц и разрешением по времени 1 мс. Были выделены дельта-ритм (0,5–3 Гц), тета-ритм (4–7 Гц), альфа-ритм (8–13 Гц), бета1- (14–19 Гц) и бета2-ритм (20–25 Гц). Для каждого отведения на односекундных интервалах со скользящим окном 100 мс и сдвигом 10 мс определяли функцию вариации и усредняли ее значения. Согласно определению, вариационная кривая — это произведение амплитуды потенциала на его частоту. Однако с учетом малых изменений частотной структуры электрических колебаний на относительно небольшом отрезке времени (одна секунда) можно говорить о ней как о показателе мощностного амплитудного типа.

На основании факторного анализа исследуемый 20-секундный отрезок ЭЭГ был разделен на три временных промежутка — 1–7, 8–10 и 11–20 секунды. Далее для каждого испытуемого по отдельности, для каждого из выделенных диапазонов ЭЭГ, усредненные по времени значения функции вариации, усреднялись вторично в выделенных временных промежутках, по всем регистрируемым отведениям. Таким образом, ЭЭГ каждого испытуемого для каждого из трех выделенных временных интервалов описывалась шестью частотными характеристиками (по числу шести избранных для анализа частотных диапазонов) (Yakovenko et al. 2022).

Коэффициент корреляции Пирсона (КК) служил показателем взаимодействия ритмов ЭЭГ. Например, для определения силы взаимодействия дельта- и альфа-1-ритмов в группе с низким САН брали вычисленные показатели дельта и альфа-1 ЭЭГ для каждого испытуемого ( $n = 8$ ) и между ними вычисляли КК. Эту операцию проводили для всех пар ритмов — по каждому из трех интервалов, на которые этот отрезок был поделен. Для оценки межгрупповых различий в поведенческих характеристиках использовали однофакторный анализ ANOVA. Статистическую обработку осуществляли с помощью пакета программ «SPSS, v.12» (Yakovenko et al. 2022).

## Результаты

Исследование функционального состояния испытуемых, предшествующего выполнению психомоторного теста, выявило две группы

испытуемых. В этих группах были обнаружены разные нейрофизиологические основы, необходимые для выполнения задания.

Для группы с низким САН среднее время сна в ночь перед опытом —  $4,85 \pm 0,8$  часа; самочувствие при пробуждении и качество сна —  $2,5 \pm 0,42$  и  $3,25 \pm 0,53$  соответственно (по пятибалльной шкале, при этом оценка «пять» означает «отлично»); средний уровень сонливости перед опытом —  $6,5 \pm 0,53$  (по семибалльной шкале, при этом оценка «отлично» — один балл). Для группы с высоким САН среднее время сна в ночь перед опытом —  $6,41 \pm 0,63$  часа; самочувствие при пробуждении и качество сна —  $3,9 \pm 0,23$  и  $4,3 \pm 0,15$  соответственно (по пятибалльной шкале, при этом оценка «пять» означает «отлично»); средний уровень сонливости перед опытом —  $4,0 \pm 0,45$  (по семибалльной шкале, при этом «отлично» — один балл). Выявлены межгрупповые различия по самочувствию при пробуждении ( $F(1;16) = 9,35$ ;  $p = 0,008$ ), качеству сна ( $F(1;16) = 4,46$ ;  $p = 0,051$ ) и среднему уровню сонливости перед опытом ( $F(1;16) = 13,07$ ;  $p = 0,002$ ). Также отдельно различаются каждый из показателей: С ( $F(1;16) = 28,22$ ;  $p = 0,0001$ ), А ( $F(1;16) = 31,92$ ;  $p = 0,0001$ ) и Н ( $F(1;16) = 16,38$ ;  $p = 0,001$ ).

Исследование взаимодействия ритмов ЭЭГ, которое в определенной мере может отражать связанную активность структурно-функциональных объединений мозга, в первые семь секунд показало несколько большее число связей ритмов ЭЭГ у испытуемых с хорошим самочувствием (шесть связей ритмов ЭЭГ) по сравнению с группой с более плохим самочувствием (четыре связи ритмов ЭЭГ) во время выполнения психомоторного теста. У группы испытуемых с хорошим самочувствием выявлены связи медленных ритмов ЭЭГ с быстрыми: тета-альфа2, тета-бета, альфа1-бета, альфа2-бета. Тогда как у испытуемых с более плохим самочувствием таких связей не наблюдалось (табл. 1).

В интервале 8–10 с при выполнении задания у группы испытуемых с хорошим самочувствием сохраняется тенденция к преобладанию числа связей ЭЭГ (семь связей) по сравнению с другой группой (четыре связи). В группе с хорошим самочувствием возникают связи с гамма-ритмом, чего не наблюдается у другой группы. У группы с худшим самочувствием только в этом временном интервале возникают связи альфа-диапазона с бета-ритмом. Этот период в целом характеризуется отсутствием связей дельта-ритма в обеих группах испытуемых (табл. 2).

Табл. 1. Взаимодействие ритмов ЭЭГ на первых 7 с после пробуждения у двух групп испытуемых

Стадии исследования	Ритмы ЭЭГ	Группы испытуемых	Достоверность взаимодействия ритмов ЭЭГ по средней величине функции вариации
Нажатие на кнопку и счет в уме (1–7 с)	Дельта-тета	Сниженное ФС	$r = 0,75; p = 0,031$
		Хорошее ФС	$r = 0,74; p = 0,014$
	Дельта-альфа 1	Сниженное ФС	$r = 0,86; p = 0,0056$
		Хорошее ФС	-
	Дельта-альфа 2	Сниженное ФС	$r = 0,89; p = 0,003$
		Хорошее ФС	-
	Дельта-бета	Сниженное ФС	-
		Хорошее ФС	-
	Дельта-гамма	Сниженное ФС	-
		Хорошее ФС	-
	Тета-альфа 1	Сниженное ФС	$r = 0,92; p = 0,001$
		Хорошее ФС	$r = 0,81; p = 0,0045$
	Тета-альфа 2	Сниженное ФС	-
		Хорошее ФС	$r = 0,82; p = 0,004$
	Тета-бета	Сниженное ФС	-
		Хорошее ФС	$r = 0,83; p = 0,003$
	Тета-гамма	Сниженное ФС	-
		Хорошее ФС	-
	Альфа 1-бета	Сниженное ФС	-
		Хорошее ФС	$r = 0,94; p = 0,0004$
	Альфа 1-гамма	Сниженное ФС	-
		Хорошее ФС	-
	Альфа 2-бета	Сниженное ФС	-
		Хорошее ФС	$r = 0,98; p = 0,0006$
	Альфа 2-гамма	Сниженное ФС	-
		Хорошее ФС	-
	Бета-гамма	Сниженное ФС	-
		Хорошее ФС	-

Примечание:  $r$  — величина коэффициента корреляции Пирсона;  $p$  — уровень значимости, ФС — функциональное состояние.

Table 1. Coupling of EEG rhythms in the first 7 seconds after awakening in two groups of subjects

Stages of the study	EEG rhythms	The group of subjects	The significance of the coupling of EEG rhythms by the average value of the variation function
Pressing the button and mental arithmetic (1–7 s)	Delta-theta	Reduced FS	$r = 0.75; p = 0.031$
		Good FS	$r = 0.74; p = 0.014$
	Delta-alpha 1	Reduced FS	$r = 0.86; p = 0.0056$
		Good FS	–
	Delta-alpha 2	Reduced FS	$r = 0.89; p = 0.003$
		Good FS	–
	Delta-beta	Reduced FS	–
		Good FS	–
	Delta-gamma	Reduced FS	–
		Good FS	–
	Theta-alpha 1	Reduced FS	$r = 0.92; p = 0.001$
		Good FS	$r = 0.81; p = 0.0045$
	Theta-alpha 2	Reduced FS	–
		Good FS	$r = 0.82; p = 0.004$
	Theta-beta	Reduced FS	–
		Good FS	$r = 0.83; p = 0.003$
	Theta-gamma	Reduced FS	–
		Good FS	–
	Alpha 1-beta	Reduced FS	–
		Good FS	$r = 0.94; p = 0.0004$
	Alpha 1-gamma	Reduced FS	–
		Good FS	–
	Alpha 2-beta	Reduced FS	–
		Good FS	$r = 0.98; p = 0.0006$
	Alpha 2-gamma	Reduced FS	–
		Good FS	–
	Beta-gamma	Reduced FS	–
		Good FS	–

Note: r—value of the Pearson correlation coefficient; p—significance level, FS—functional state.

Табл. 2. Взаимодействие ритмов ЭЭГ в интервале 8–10 с после пробуждения у двух групп испытуемых

Стадии исследования	Ритмы ЭЭГ	Группы испытуемых	Достоверность взаимодействия ритмов ЭЭГ по средней величине функции вариации
Нажатие на кнопку и счет в уме (8–10 с)	Дельта-тета	Сниженное ФС	–
		Хорошее ФС	–
	Дельта-альфа 1	Сниженное ФС	–
		Хорошее ФС	–
	Дельта-альфа 2	Сниженное ФС	–
		Хорошее ФС	–
	Дельта-бета	Сниженное ФС	–
		Хорошее ФС	–
	Дельта-гамма	Сниженное ФС	–
		Хорошее ФС	–
	Тета-альфа 1	Сниженное ФС	$r = 0,94; p = 0,0006$
		Хорошее ФС	$r = 0,81; p = 0,0043$
	Тета-альфа 2	Сниженное ФС	$r = 0,89; p = 0,003$
		Хорошее ФС	$r = 0,73; p = 0,015$
	Тета-бета	Сниженное ФС	–
		Хорошее ФС	$r = 0,73; p = 0,017$
	Тета-гамма	Сниженное ФС	–
		Хорошее ФС	–
	Альфа 1-бета	Сниженное ФС	$r = 0,71; p = 0,049$
		Хорошее ФС	$r = 0,77; p = 0,008$
	Альфа 1-гамма	Сниженное ФС	–
		Хорошее ФС	–
	Альфа 2-бета	Сниженное ФС	$r = 0,82; p = 0,012$
		Хорошее ФС	$r = 0,95; p = 0,0001$
	Альфа 2-гамма	Сниженное ФС	–
		Хорошее ФС	$r = 0,78; p = 0,008$
	Бета-гамма	Сниженное ФС	–
		Хорошее ФС	$r = 0,85; p = 0,002$

Примечание:  $r$  — величина коэффициента корреляции Пирсона;  $p$  — уровень значимости, ФС — функциональное состояние.

Table 2. Coupling of EEG rhythms in the interval of 8–10 seconds after awakening in two groups of subjects

Stages of the study	EEG rhythms	The group of subjects	The significance of the coupling of EEG rhythms by the average value of the variation function
Pressing the button and mental arithmetic (8–10 s)	Delta-theta	Reduced FS	–
		Good FS	–
	Delta-alpha 1	Reduced FS	–
		Good FS	–
	Delta-alpha 2	Reduced FS	–
		Good FS	–
	Delta-beta	Reduced FS	–
		Good FS	–
	Delta-gamma	Reduced FS	–
		Good FS	–
	Theta-alpha 1	Reduced FS	$r = 0.94; p = 0.0006$
		Good FS	$r = 0.81; p = 0.0043$
	Theta-alpha 2	Reduced FS	$r = 0.89; p = 0.003$
		Good FS	$r = 0.73; p = 0.015$
	Theta-beta	Reduced FS	–
		Good FS	$r = 0.73; p = 0.017$
	Theta-gamma	Reduced FS	–
		Good FS	–
	Alpha 1-beta	Reduced FS	$r = 0.71; p = 0.049$
		Good FS	$r = 0.77; p = 0.008$
	Alpha 1-gamma	Reduced FS	–
		Good FS	–
	Alpha 2-beta	Reduced FS	$r = 0.82; p = 0.012$
		Good FS	$r = 0.95; p = 0.0001$
	Alpha 2-gamma	Reduced FS	–
		Good FS	$r = 0.78; p = 0.008$
	Beta-gamma	Reduced FS	–
		Good FS	$r = 0.85; p = 0.002$

Note: r—value of the Pearson correlation coefficient; p—significance level, FS—functional state.

Период с 11 по 20 с, когда испытуемый считает про себя без нажатия на кнопку, характеризуется практически всем набором изучаемых связей ритмов ЭЭГ (10 связей) у испытуемых с хорошим самочувствием в отличие от испытуемых с более плохим самочувствием (три связи). Что интересно, в этой группе вновь возникают связи дельта-ритма с тета- и альфа2-ритмами. При этом группа испытуемых с более плохим самочувствием характеризовалась

наличием трех связей ритмов ЭЭГ: тета-альфа1, тета-альфа2 и бета-гамма (табл. 3).

Таким образом, группы испытуемых с хорошим и сниженным функциональным состоянием различались количеством связей ритмов ЭЭГ. Испытуемые с хорошим функциональным состоянием накануне эксперимента характеризовались большим числом связей. Преобладание формировалось в основном за счет объединения медленных и быстрых ритмов ЭЭГ.

Табл. 3. Взаимодействие ритмов ЭЭГ в интервале 11–20 с после пробуждения у двух групп испытуемых

Стадии исследования	Ритмы ЭЭГ	Группы испытуемых	Достоверность взаимодействия ритмов ЭЭГ по средней величине функции вариации
Счет в уме (11–20 с)	Дельта-тета	Сниженное ФС	–
		Хорошее ФС	$r = 0,82; p = 0,004$
	Дельта-альфа 1	Сниженное ФС	–
		Хорошее ФС	–
	Дельта-альфа 2	Сниженное ФС	$r = 0,75; p = 0,01$
		Хорошее ФС	–
	Дельта-бета	Сниженное ФС	–
		Хорошее ФС	–
	Дельта-гамма	Сниженное ФС	–
		Хорошее ФС	–
	Тета-альфа 1	Сниженное ФС	$r = 0,88; p = 0,0036$
		Хорошее ФС	$r = 0,86; p = 0,001$
	Тета-альфа 2	Сниженное ФС	$r = 0,879; p = 0,004$
		Хорошее ФС	$r = 0,70; p = 0,023$
	Тета-бета	Сниженное ФС	–
		Хорошее ФС	$r = 0,64; p = 0,046$
	Тета-гамма	Сниженное ФС	–
		Хорошее ФС	$r = 0,63; p = 0,052$
	Альфа 1-бета	Сниженное ФС	–
		Хорошее ФС	$r = 0,72; p = 0,019$
	Альфа 1-гамма	Сниженное ФС	–
		Хорошее ФС	–
	Альфа 2-бета	Сниженное ФС	–
		Хорошее ФС	$r = 0,97; p = 0,0005$
Альфа 2-гамма	Сниженное ФС	–	
	Хорошее ФС	$r = 0,86; p = 0,001$	
Бета-гамма	Сниженное ФС	$r = 0,78; p = 0,021$	
	Хорошее ФС	$r = 0,95; p = 0,00002$	

Примечание: r — величина коэффициента корреляции Пирсона; p — уровень значимости, ФС — функциональное состояние.

Table 3. Coupling of EEG rhythms in the interval of 11-20 seconds after awakening in two groups of subjects

Stages of the study	EEG rhythms	The group of subjects	The significance of the coupling of EEG rhythms by the average value of the variation function
mental arithmetic (11–20 s)	Delta-theta	Reduced FS	–
		Good FS	$r = 0.82; p = 0.004$
	Delta-alpha 1	Reduced FS	–
		Good FS	–
	Delta-alpha 2	Reduced FS	$r = 0.75; p = 0.01$
		Good FS	–
	Delta-beta	Reduced FS	–
		Good FS	–
	Delta-gamma	Reduced FS	–
		Good FS	–
	Theta-alpha 1	Reduced FS	$r = 0.88; p = 0.0036$
		Good FS	$r = 0.86; p = 0.001$
	Theta-alpha 2	Reduced FS	$r = 0.879; p = 0.004$
		Good FS	$r = 0.70; p = 0.023$
	Theta-beta	Reduced FS	–
		Good FS	$r = 0.64; p = 0.046$
	Theta-gamma	Reduced FS	–
		Good FS	$r = 0.63; p = 0.052$
	Alpha 1- beta	Reduced FS	–
		Good FS	$r = 0.72; p = 0.019$
	Alpha 1- gamma	Reduced FS	–
		Good FS	–
	Alpha 2- beta	Reduced FS	–
		Good FS	$r = 0.97; p = 0.0005$
Alpha 2- gamma	Reduced FS	–	
	Good FS	$r = 0.86; p = 0.001$	
Beta-gamma	Reduced FS	$r = 0.78; p = 0.021$	
	Good FS	$r = 0.95; p = 0.00002$	

Note: r—value of the Pearson correlation coefficient; p—significance level, FS—functional state.

### Обсуждение

Амплитудно-амплитудное взаимодействие ритмов ЭЭГ, вероятно, отражает не просто совместное, но связанное (сопряженное) участие структурно-функциональных корково-подкорковых систем. В представленной работе была выявлена существенная разница в количестве связей ритмов и времени их появления у испытуемых с хорошим функциональным состоянием перед началом эксперимента и ухудшенным состоянием. У испытуемых с хорошим

функциональным состоянием наблюдалось существенно большее количество связей ритмов ЭЭГ, и отмечался их количественный рост от первого к третьему временному отрезку (первые два временных отрезка — счет в уме с одновременным нажатием на кнопку; третий — счет в уме, переходящий в засыпание), чем в группе с ухудшенным состоянием. Это может свидетельствовать о большей и нарастающей включенности структурно-функциональных объединений мозга при выполнении задания после пробуждения у группы с хорошим функциональным состоянием (рис. 1).

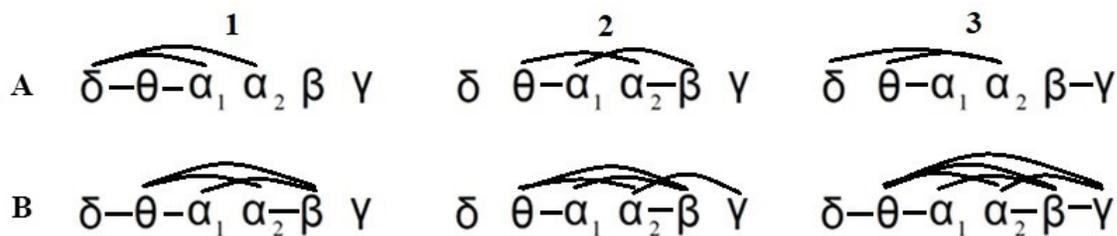


Рис. 1. Взаимодействие ритмов ЭЭГ (суммарно по всем отведениям) при возобновлении психомоторной деятельности в первые 20 с после самопроизвольного пробуждения из кратковременного дневного сна у студентов с разным уровнем функционального состояния. 1, 2, 3 — выделенные на основании факторного анализа отрезки времени с однородной ЭЭГ (1–7, 8–10, 11–20 с соответственно); А, В — группы со сниженным и хорошим функциональным состоянием соответственно; δ, θ, α<sub>1</sub>, α<sub>2</sub>, β и γ — дельта-, тета-, низкочастотный альфа-, высокочастотный альфа-бета- и гамма-ритмы ЭЭГ соответственно. Статистически значимые связи ( $p < 0,05$ ) показаны соединительными линиями между условным обозначением ритмов

Fig. 1. The coupling of EEG rhythms (in total for all leads) during the resumption of psychomotor activity in the first 20 seconds after spontaneous awakening from short-term daytime sleep in students with different levels of functional state. 1, 2, 3—time intervals with homogeneous EEG isolated on the basis of factor analysis (1–7, 8–10, 11–20 s, respectively); А, В—groups with reduced and good functional state, respectively; δ, θ, α<sub>1</sub>, α<sub>2</sub>, β and γ—delta-, theta-, low-frequency alpha-, high-frequency alpha-beta and gamma rhythms of the EEG, respectively. Statistically significant connections ( $p < 0.05$ ) are shown by connecting lines between the symbol of rhythms

Первые семь секунд выполнения задания (испытуемые нажимали на кнопку и считали про себя) продемонстрировали существенную разницу в объединении ритмов ЭЭГ в группах испытуемых: если в группе с хорошим функциональным состоянием преобладали связи тета- и альфа-ритмов с бета-ритмом, то в другой группе — в основном связи дельта-ритма с тета- и альфа-ритмами. Считается, что ритмы ЭЭГ в каких-то пределах отражают работу тех или иных корково-подкорковых образований или отдельных структур мозга. В частности, тета-ритм связан с функционированием кортико-гиппокампальной корково-подкорковой системы; альфа- и дельта-ритмы — таламо-кортикальной системы; а бета-ритм — отдельных областей или структур мозга, в частности, неокортекса, таламуса и гиппокампа (Bibbig et al. 2007; Caporro et al. 2012; Harmony 2013; Linas et al. 1991).

Опираясь на вышеупомянутые работы, можно предположить, что в группе с хорошим самочувствием таламо-кортикальная и кортико-гиппокампальная системы находятся в более активированном состоянии за счет объединения медленных ритмов с быстрыми по сравнению с другой группой.

Преобладание связей дельта-ритма с тета в группе со сниженным функциональным

состоянием может отражать сопряженную работу двух корково-подкорковых систем: таламо-кортикальной системы и кортико-гиппокампальной. Связанность дельта- и альфа-ритмов может, предположительно, свидетельствовать об объединении большого числа структур таламо-кортикальной системы. В нашей предыдущей работе (Yakovenko et al. 2022) было показано наличие таких связей за пять секунд до пробуждения. Вероятно, в группе испытуемых с ухудшенным самочувствием сильнее выражен эффект инерции сна. В работах (Balkin, Badia 1988; Cheremushkin et al. 2020; Dorokhov et al. 2018; Langdon, Hartman 1961) показано, что увеличение спектров мощности низкочастотных ритмов ЭЭГ, в частности, дельта-ритма, может являться коррелятом инерции сна, которая, в свою очередь может негативно сказываться как на физической работе, так и интеллектуальной.

На временном интервале 8–10 секунд дельта-ритм не «участвует» в выполнении задания в обеих группах испытуемых. В то же время при наличии связей тета-ритма с обоими поддиапазонами альфа-ритма в обеих группах испытуемых, в группе с хорошим функциональным состоянием отмечена связь тета-бета ритмов. Можно сделать предположение о несколько большей активации кортико-гиппокампальной системы в этой группе. Как известно, тета-ритм

отражает в определенной мере работу гиппокампа. Исходя из этого, можно предположить, что именно на этом временном отрезке происходит извлечение из памяти второй части инструкции (продолжать считать про себя, но не нажимать на кнопку).

В группе с хорошим функциональным состоянием также выявлены связи альфа2- и бета-ритмов с гамма-ритмом в этот временной интервал. Известно, что гамма-ритм регистрируется при усилении внимания, процессах перцепции, опознании стимула, формировании образа, выполнении семантических операций. Он также может сопровождать процессы сознания (Danilova et al. 2002).

Известно, что бета-ритм связан с осуществлением многих когнитивных процессов, в частности с процессом обучения, внимания, памяти (Bibbig et al. 2007; Cannon et al. 2014). Вероятно, бета-ритм в сочетании с другими ритмами поддерживает необходимый уровень внимания и памяти при выполнении психомоторного теста.

На временном интервале 11–20 секунд испытуемый считает про себя без нажатия на кнопку. В этот период времени вновь возникает связь дельта-ритма с тета в группе испытуемых с хорошим самочувствием и дельта-с альфа2-ритмом в группе со сниженным функциональным состоянием.

В работе Ярец с соавторами (2018) показано, что счет в уме сопровождается изменениями дельта-ритма. Изменения дельта-ритма могут отражать функционально-метаболическую основу когнитивной деятельности, в частности, особенности ресурсов произвольного внимания — его концентрацию и скорость переключения. Авторами также выявлена высокая активность ритмов альфа-2 и альфа-3 (9–12,5 Гц), которая может отражать вовлеченность в выполняемую деятельность рабочей памяти, а также визуального и пространственного внимания (Yarets et al. 2018).

Иными словами, в этот временной отрезок испытуемые с хорошим функциональным состоянием показывают объединение таламокортикальной и кортико-гиппокампальной систем мозга, тогда как испытуемые с ухудшенным функциональным состоянием демонстрируют более широкую представленность таламокортикальной системы.

В этом интервале в обеих группах отмечены связи тета-ритма с альфа1 и альфа2. Группа испытуемых с хорошим функциональным состоянием характеризуется связями тета-ритма не только с поддиапазонами альфа-ритма,

но и бета- и гамма-ритмами. Можно предположить большую активацию кортико-гиппокампальной системы у этой группы испытуемых.

Ишии с соавторами (2014) показали, что во время мысленных вычислений тета-ритм генерируется в дорсальной передней поясной извилине и прилегающей медиальной префронтальной коре. Также отмечалась синхронизация, связанная с гамма-событиями, в качестве показателя активации в правых теменных областях, отвечающих за базовую обработку чисел и пространственное внимание, основанное на числах (Ishii et al. 2014).

В период счета в уме выявлены связи альфа-ритма с бета- и гамма-ритмами в группе испытуемых с хорошим функциональным состоянием, что может свидетельствовать о большей активации структур мозга. Вероятно, испытуемые с нормальным функциональным состоянием дольше считают про себя и дольше удерживаются от погружения в сон. При этом плохое функциональное состояние почти сразу после нажатий погружает субъекта в сон.

Итак, показана функциональная связь ритмов ЭЭГ, а не просто одновременная регистрация сходных амплитуд ритмов при выполнении психомоторного теста.

Группы испытуемых, характеризующиеся разным функциональным состоянием перед экспериментом, продемонстрировали разные нейрофизиологические основы, обеспечивающие выполнение психомоторного теста.

В целом группа испытуемых с большим временем сна, с меньшим уровнем сонливости, а соответственно, с хорошим функциональным состоянием имела больше связей медленных ритмов с быстрыми. Это может свидетельствовать о большей активации мозговых структур и готовности выполнять задание. Группа с меньшим временем сна, большим уровнем сонливости и несколько сниженным показателем функционального состояния имеет меньше связей в целом и, в частности, связей медленных ритмов с быстрыми. Вероятно, мозг этих испытуемых работает в более «экономичном» режиме.

На полученные результаты можно опираться при оценке функционального состояния человека в кризисных и экстремальных условиях деятельности при сокращенной длительности сна.

## Заключение

Выполнение психомоторного теста у испытуемых с различным исходным функциональным состоянием сопровождалось различной дина-

микой взаимодействия ритмов ЭЭГ. Испытуемые с исходно хорошим самочувствием продемонстрировали на всех трех исследуемых временных отрезках существенно больше связей ритмов по сравнению с испытуемыми с худшим состоянием. В целом у первых отмечены 22 связи ритмов, тогда как у вторых — 12. Различия заключались в скорости появления связей. Группа с хорошим самочувствием быстрее формировала связи медленных ритмов с бета- (интервал 1–7 с) и с гамма-ритмом (интервал 8–10 с). Группа со сниженным самочувствием эти же связи демонстрировала с отставанием в один временной интервал. Количество связей медленных ритмов с быстрыми в группе с хорошим самочувствием было существенно больше (12 против 3). В этой же группе испытуемых в интервале 11–20 секунд возникали связи дельта-ритма с альфа<sub>2</sub> и тета.

Исходя из этого, можно сделать заключение о том, что испытуемые с хорошим самочувствием перед экспериментом имеют иную нейрофизиологическую основу для выполнения психомоторного теста после пробуждения.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии потенциального или явного конфликта интересов.

### Conflict of Interest

The authors declare that there is no conflict of interest, either existing or potential.

### Соответствие принципам этики

Исследование соответствовало этическим нормам Хельсинкской декларации Всемирной медицинской ассоциации «Этические принципы

проведения научных медицинских исследований с участием человека» с поправками 2000 г. и «Правилами клинической практики в Российской Федерации», утвержденными Приказом Минздрава РФ от 19.06.2003 г. № 266.

### Ethics Approval

The study complied with the ethical norms of the WMA Declaration of Helsinki 'Ethical Principles for Medical Research Involving Human Subjects' as amended in 2000 and 'Rules of Clinical Practice in the Russian Federation' approved by the Order of the Ministry of Health of the Russian Federation No. 266, 19 June 2003.

### Вклад авторов

- а) Яковенко Ирина Анатольевна — подготовка рукописи к публикации;
- б) Петренко Надежда Евгеньевна — постановка эксперимента, обработка данных, редактирование статьи;
- в) Черемушкин Евгений Алексеевич — постановка эксперимента, обработка данных, редактирование статьи;
- г) Дорохов Владимир Борисович — руководство работой, методическая разработка.

### Author Contributions

- a) Irina A. Yakovenko prepared the manuscript for publication;
- b) Nadezhda E. Petrenko conducted the experiment, performed data processing, edited the manuscript;
- c) Evgeny A. Cheremushkin conducted the experiment, performed data processing, edited the manuscript;
- d) Vladimir B. Dorokhov supervised the study, developed the methodology.

### Список сокращений

ФС — функциональное состояние; ЭМГ — электромиограмма; ЭОГ — электроокулограмма, ЭЭГ — электроэнцефалограмма.

### List of Abbreviations

FS—functional state; EEG—electroencephalogram; EMG—electromyogram; EOG—electrooculogram.

### References

Balkin, T. J., Badia, P. (1988) Relationship between sleep inertia and sleepiness: Cumulative effects of four nights of sleep disruption/restriction on performance following abrupt nocturnal awakenings. *Biological Psychology*, vol. 27, no. 3, pp. 245–258. [https://doi.org/10.1016/0301-0511\(88\)90034-8](https://doi.org/10.1016/0301-0511(88)90034-8) (In English)

- Bibbig, A., Middleton, S., Racca, C. et al. (2007) Beta rhythms (15–20 Hz) generated by nonreciprocal communication in hippocampus. *Journal of Neurophysiology*, vol. 97, no. 4, pp. 2812–2823. <https://doi.org/10.1152/jn.01105.2006> (In English)
- Cannon, J., McCarthy, M. M., Lee, Sh. et al. (2014) Neurosystems: Brain rhythms and cognitive processing. *European Journal of Neuroscience*, vol. 39, no. 5, pp. 705–719. <https://doi.org/10.1111/ejn.12453> (In English)
- Caporro, M., Haneef, Z., Yeh, H. J. et al. (2012) Functional MRI of sleep spindles and K-complexes. *Clinical Neurophysiology*, vol. 123, no. 2, pp. 303–309. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2011.06.018> (In English)
- Cheremushkin, E. A., Petrenko, N. E., Gendzhaliyeva, M. S. et al. (2020) Kharakteristiki EEG v protsesse kratkovremennykh samoproizvol'nykh probuzhdenij raznoj dlitel'nosti pri izmeneniyakh v psikhomotornoj deyatel'nosti, vyzvannykh zasypaniem [EEG characteristics in the process of short-time spontaneous wakes of different duration at changes in psychomotor activity caused by falling asleep]. *Rossijskij fiziologicheskij zhurnal im. I. M. Sechenova — Russian Journal of Physiology*, vol. 106, no. 3, pp. 342–355. <https://doi.org/10.31857/S0869813920030036> (In Russian)
- Danilova, N. N., Bykova, N. B., Anisimov, N. V. et al. (2002) Gamma-ritm elektricheskoy aktivnosti mozga cheloveka v sensornom kodirovanii [Gamma rhythm of electrical activity of the human brain in sensory coding]. *Biomeditsinskie tekhnologii i radioelektronika*, no. 3, pp. 34–41. (In Russian)
- Dorokhov, V. B., Malakhov, D. G., Orlov, V. A., Ushakov, V. L. (2018) Experimental model of study of consciousness at the awakening: fMRI, EEG and behavioral methods. In: A. V. Samsonovich (ed.). *Biologically Inspired Cognitive Architectures 2018. Proceedings of the Ninth Annual Meeting of the BICA Society*. Switzerland: Springer Cham Publ., pp. 82–87. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-99316-4\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-319-99316-4_11) (In English)
- Hajak, G., Klingelhöfer, J., Schulz-Varzegi, M. et al. (1994) Relationship between cerebral blood flow velocities and cerebral electrical activity in sleep. *Sleep*, vol. 17, no. 1, pp. 11–19. <https://doi.org/10.1093/sleep/17.1.11> (In English)
- Harmony, T. (2013) The functional significance of delta oscillations in cognitive processing. *Frontiers Integrative Neuroscience*, vol. 7, article 83. <https://doi.org/10.3389/fnint.2013.00083> (In English)
- Ishii, R., Canuet, L., Ishihara, T. et al. (2014) Frontal midline theta rhythm and gamma power changes during focused attention on mental calculation: An MEG beamformer analysis. *Frontiers in Human Neuroscience*, vol. 8, article 406. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00406> (In English)
- Langdon, D. E., Hartman, B. (1961) Performance upon sudden awakening. *Technical documentary report SAM-TDR. USAF School of Aerospace Medicine*, vol. 62, no. 17, p. 8. PMID: 14462063 (In English)
- Linás, R. R., Grace, A. A., Yarom, Y. (1991) In vitro neurons in mammalian cortical layer 4 exhibit intrinsic oscillatory activity in the 10- to 50-Hz frequency range. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, vol. 88, no. 3, pp. 897–901. <https://doi.org/10.1073/pnas.88.3.897> (In English)
- Marzano, C., Ferrara, M., Moroni, F., De Gennaro, L. (2011) Electroencephalographic sleep inertia of the awakening brain. *Neuroscience*, vol. 176, pp. 308–317. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2010.12.014> (In English)
- Rutskova, Ye. M. (2016) Inertsiya sna [Sleep inertia]. *Effektivnaya farmakoterapiya. Nevrologiya i psikiatriya. Spetsvypusk “Son i ego rasstrojstva – 4” — Effective Pharmacotherapy. Neurology and Psychiatry. Special Issue “Sleep and Sleep Disorders – 4”*, no. 19, pp. 16–23. (In Russian)
- Tassi, P., Bonnefond, A., Engasser, O. et al. (2006) EEG spectral power and cognitive performance during sleep inertia: The effect of normal sleep duration and partial sleep deprivation. *Physiology and Behavior*, vol. 87, no. 1, pp. 177–184. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2005.09.017> (In English)
- Trotti, L. M. (2017) Waking up is the hardest thing I do all day: Sleep inertia and sleep drunkenness. *Sleep Medicine Reviews*, vol. 35, pp. 76–84. <https://doi.org/10.1016/j.smrv.2016.08.005> (In English)
- Vallat, R., Meunier, D., Nicolas, A., Ruby, P. (2019) Hard to wake up? The cerebral correlates of sleep inertia assessed using combined behavioral, EEG and fMRI measures. *NeuroImage*, vol. 184, pp. 266–278. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.09.033> (In English)
- Yakovenko, I. A., Petrenko, N. E., Cheremushkin, E. A., Dorokhov, V. B. (2022) Dynamics of EEG rhythm interaction preceding the awakening moment with subsequent restoration of activity after brief falling asleep episodes. *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology*, vol. 58, no. 2, pp. 558–568. <https://doi.org/10.1134/S0022093022020235> (In English)
- Yaretz, M. Yu., Sharova, E. V., Smirnov, A. S. et al. (2018) Analiz strukturno-funktsional'noj organizatsii zadachi scheta v kontekste issledovaniya upravlyayushchikh funktsij [Analysis of the structural and functional organization of the counting problem in the context of the study of control functions]. *Zhurnal vysshej nervnoj deyatel'nosti im. I. P. Pavlova*, vol. 68, no. 2, pp. 176–189. <https://doi.org/10.7868/s0044467718020041> (In Russian)