

УДК 612.821.2

ИЗМЕНЕНИЯ ПАТТЕРНОВ СЕНСОМОТОРНЫХ РИТМОВ ЭЭГ ПРИ ДВИГАТЕЛЬНОМ ВООБРАЖЕНИИ

CHANGES IN PATTERNS OF SENSORIMOTOR EEG RHYTHMS DURING MOTOR IMAGERY

Пятин В.Ф.^{1,2}
Колсанов А.В.^{1,2}
Сергеева М.С.^{1,2}
Коровина Е.С.¹
Захаров А.В.^{1,2}

Pyatin VF^{1,2}
Kolsanov AV^{1,2}
Segreeva MS^{1,2}
Korovina ES¹
Zakharov AV^{1,2}

1. ФГБОУ ВО «Самарский государственный медицинский университет» Минздрава России.

2. Центр прорывных исследований «IT в медицине» СамГМУ.

1. Samara State Medical University.

2. Center for breakthrough research «IT in Medicine», Samara State Medical University.

Цель — выявление общих и индивидуальных особенностей в паттернах сенсомоторных ритмов ЭЭГ при воображении движений в верхних и нижних конечностях человека.

Материалы и методы. В исследовании приняли участие 20 студентов-правшей Самарского государственного медицинского университета в возрасте 18–20 лет, подписавшие информированное согласие. ЭЭГ регистрировалась монополярно с помощью 128-канальной системы записи ЭЭГ (BP-010302 BrainAmpStandart 128) в состоянии покоя, при воображении моновекторных движений в 4-х конечностях (сгибание пальцев правой руки, сгибание пальцев левой руки, тыльное сгибание правой стопы, тыльное сгибание левой стопы), при воображении трехвекторных движений в доминантной руке (сгибание пальцев, сгибание в локтевом суставе, ротация кисти).

В процессе обработки ЭЭГ использовались такие программы и методы, как анализ независимых компонентов, частотно-пространственная фильтрация, LORETA, MatLab, IBM SPSS Statistics 22.

Результаты. Обнаружена высокая значимость альфа2- и бета2- частотных диапазонов ЭЭГ в формировании контралатерального очага активации при воображении движений в конечностях. ERD/ERS в ритмах ЭЭГ были более выражены при воображении движений в доминантных конечностях (правой руке и в правой ноге), чем в недоминантных. Кроме общих тенденций изменений ЭЭГ при воображении моновекторных движений в 4-х конечностях нами обнаружена и индивидуальность ответов сенсомоторных ритмов ЭЭГ. Не установлена значимость изменений мощности сенсомоторных ритмов ЭЭГ для дифференцирования 3-х степеней свободы при воображении движений в одной конечности.

Заключение. Связанная с воображением движения вызванная реакция десинхронизации/синхронизации (ERD/ERS) сенсомоторных ритмов ЭЭГ имеет индивидуальные особенности, классификация которых позволит существенно увеличить количество степеней свободы при создании и реализации системы ИМК.

Ключевые слова: ЭЭГ, интерфейс «мозг-компьютер», сенсомоторные ритмы, вызванные реакции десинхронизации/синхронизации, двигательное воображение.

Aim — the determination of common and individual characteristics in patterns of sensorimotor rhythms of EEG during motor imagery in upper and lower limbs.

Materials and methods. 20 right-handed students of Samara State Medical University at the age of 18–20 years took part in the investigation, signing informed consent. Monopolar EEG was recorded with the use of 128-channel EEG recording system (BP-010302 BrainAmpStandart 128) at rest and during the imagining of monovector movements in 4 limbs (bending fingers of the right hand, bending fingers of the left hand, dorsiflexion of the right foot, dorsiflexion of the left foot); and during the imagining of triple-vector movements in the dominant hand (fingers bending, elbow flexion, wrist rotation).

The following programs and methods were used during the processing of EEG: MatLab, IBM SPSS Statistics 22, ICA (independent component analysis), CSP (Common Spatial Pattern), LORETA.

Results. It was found out that alpha2- and beta2- EEG frequency bands are highly significant for the formation of contralateral activation focus during motor imagery in the 4 limbs. ERD/ERS of the EEG rhythms were more pronounced during imagining movements in the dominant limbs (right hand, right leg) than in non-dominant. We found individuality of responses of sensorimotor EEG rhythms in addition to the general trends of EEG changes during imagination of one-type movement in the 4 limbs. The significance of changes in the power of EEG sensorimotor rhythms for differentiating 3 degrees of freedom during motor imagery in one limb was not found.

Conclusion. Event-related desynchronization/synchronization (ERD/ERS) of sensorimotor EEG rhythms related to motor imagery has individual characteristics and their classification will lead to the significant increase of the number of degrees of freedom in creation and implementation of BCI.

Keywords: EEG, brain-computer interface, event-related desynchronization/synchronization, sensorimotor rhythms, motor imagery.

■ ВВЕДЕНИЕ

Значительные перспективы в разработке и применении интерфейса «мозг-компьютер» (ИМК) связаны с корреляцией между двигательным воображением и сенсомоторными ритмами ЭЭГ, которые в этом случае могут использоваться в качестве управляющего сигнала в ИМК [1, 2, 3]. Применение двигательных образов в технологиях ИМК связано с теорией «функциональной эквивалентности», суть которой заключается в частичном перекрытии нейронных сетей, которые контролируют реальные движения и их ментальную репрезентацию [4, 5]. В то же время связанная с воображением движения вызванная реакция десинхронизации/синхронизации (ERD/ERS) сенсомоторных ритмов ЭЭГ имеет индивидуальные особенности, классификация которых позволит существенно увеличить количество степеней свободы при создании и реализации системы ИМК.

■ ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Выявление общих и индивидуальных особенностей в паттернах сенсомоторных ритмов ЭЭГ при воображении движений в верхних и нижних конечностях человека.

■ МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В исследовании приняли участие 20 студентов-правшей Самарского государственного медицинского университета в возрасте 18–20 лет, подписавшие информированное согласие. ЭЭГ регистрировалась монополярно с помощью 128-канальной системы записи ЭЭГ (BP-010302 BrainAmpStandart 128). Во время исследования испытуемые находились в звукоизолированной комнате. Они сидели в ЭЭГ-кресле, с закрытыми глазами, в состоянии покоя (Neurobotics, Россия). Протокол регистрации ЭЭГ сигналов был представлен следующими заданиями для испытуемых:

1) воображение моновекторных движений в 4-х конечностях (сгибание пальцев правой руки, сгибание пальцев левой руки, тыльное сгибание правой стопы, тыльное сгибание левой стопы);

2) воображение трехвекторных движений в доминантной руке (сгибание пальцев, сгибание в локтевом суставе, ротация кисти).

Протокол проведения эксперимента: время регистрации ЭЭГ при планировании одного вида движения составило 2,5 мин; количество попыток воображения одного движения — 10; продолжительность одной попытки воображения движения — 3 сек; интервал между попытками воображения движения — 10 сек. В качестве стимульной метки на ЭЭГ использовался звуковой сигнал.

Процессинг ЭЭГ:

(1) окулографическая фильтрация ICA (анализ независимых компонентов);

(2) анализ динамики мощности ритмов ЭЭГ (с помощью MatLab ЭЭГ разделялась на отдельные частотные диапазоны: дельта (0,3–3,9 Гц), тета1 (4,0–5,9 Гц), тета2 (6,0–7,6 Гц), альфа1 (7,7–9,2 Гц), альфа2

(9,3–10,5 Гц), альфа3 (10,6–12,9 Гц), бета1 (13,0–19,9 Гц), бета2 (20,0–35,0 Гц), гамма (36,0–170,0 Гц). Каждый частотный диапазон обрабатывался с помощью IBM SPSS Statistics 22.);

(3) анализ ERD/ERS сенсомоторных ритмов: альфа1, альфа2, альфа3, бета1, бета2;

(4) оценка достоверности регистрируемых изменений мощности значимых ритмов ЭЭГ (IBM SPSS Statistics 22);

(5) частотно-пространственная фильтрация (Common Spatial Pattern, CSP), LORETA (Low Resolution Brain Electromagnetic Tomograph).

Достоверность измерений оценивалась параметрическими и непараметрическими методами. Статистически значимыми изменения средних величин считались при $p < 0,001$.

■ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ ЭЭГ сигналов, зарегистрированных при воображении моновекторных движений в 4-х конечностях.

Обработка ЭЭГ сигналов, зарегистрированных при воображении моновекторных движений в 4-х конечностях логистической регрессией и ROC-анализом, выявила наибольшие величины площади под ROC-кривой, соответственно высокую чувствительность и специфичность изменений мощности в альфа2- ($0,941 \pm 0,016$) и бета2- ($0,933 \pm 0,004$) ритмах, а наименьшие — в бета1- частотном диапазоне ЭЭГ ($0,772 \pm 0,007$) (табл. 1).

Анализ количества достоверных ($p < 0,001$) отведений ЭЭГ показал наименьшую величину отведений при воображении движений в левой ноге (в альфа3- и бета1-ритмах), в левой руке (в альфа3-ритме), в правой ноге (в бета1- ритме).

Аналогичная тенденция была отмечена при проведении пространственно-частотной фильтрации ритмов ЭЭГ во время воображения движений (CSP) (рис. 1). Нами обнаружена высокая значимость альфа2- и бета2-частотных диапазонов ЭЭГ в формировании контралатерального очага активации при воображении движений в конечностях.

В нашей работе анализ ЭЭГ, зарегистрированных при воображении моновекторных движений в 4-х конечностях, выявил полиморфизм ERD/ERS сенсомоторных ритмов при воображении сгибания пальцев руки и тыльного сгибания стопы в доминантных и не-

Таблица 1. Среднее значение площади под ROC-кривой в частотных диапазонах ЭЭГ при воображении движений ($M \pm t$)

Типы движений	Ритмы ЭЭГ				
	Альфа1	Альфа2	Альфа3	Бета1	Бета2
Правая рука	0,899 ± 0,006	0,953 ± 0,011	0,862 ± 0,003	0,766 ± 0,005	0,939 ± 0,008
Левая рука	0,889 ± 0,019	0,956 ± 0,023	0,874 ± 0,011	0,797 ± 0,009	0,932 ± 0,004
Правая нога	0,896 ± 0,004	0,885 ± 0,048	0,864 ± 0,012	0,759 ± 0,025	0,934 ± 0,006
Левая нога	0,939 ± 0,002	0,972 ± 0,002	0,857 ± 0,019	0,764 ± 0,004	0,927 ± 0,017

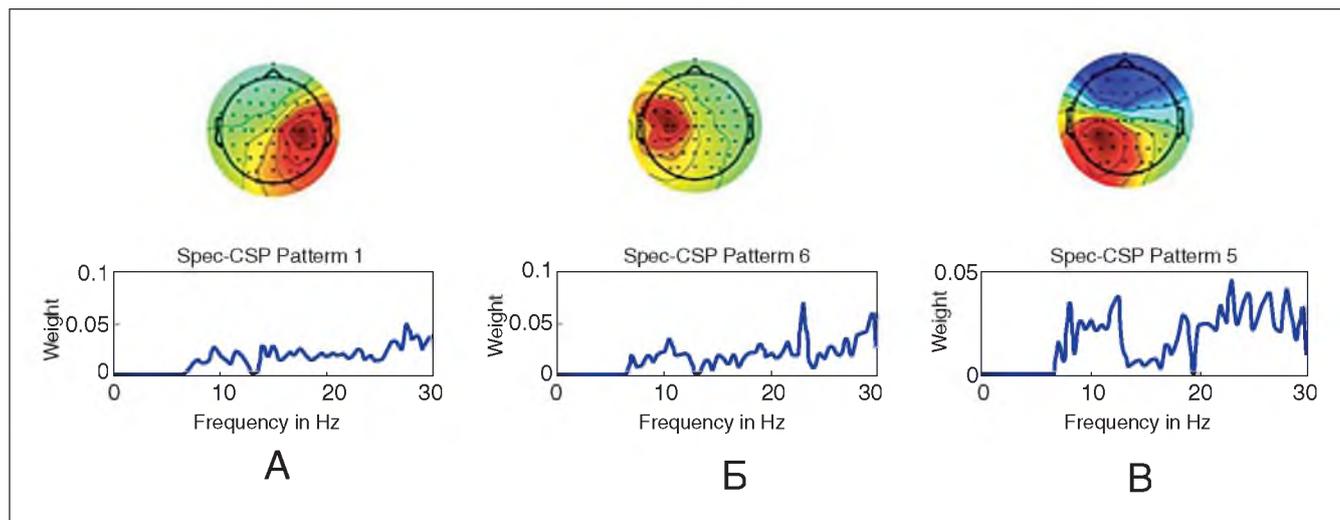


Рисунок 1. Общая картина пространственного распределения во время воображения движений: А – сгибание пальцев левой руки; Б - сгибание пальцев правой руки; В - тыльное сгибание правой стопы.

доминантных конечностях (рис. 2). ERD/ERS в ритмах ЭЭГ были более выражены при воображении движений в доминантных конечностях (правой руке и в правой ноге), чем в недоминантных.

Кроме общих тенденций изменений ЭЭГ при воображении моновекторных движений в 4-х конечностях, нами обнаружена и индивидуальность ответов сенсомоторных ритмов ЭЭГ. Так, последовательное воображение одного и того же паттерна движения в верхних и нижних конечностях сопровождалось полиморфизмом характера изменения мощности сенсомоторных ритмов ЭЭГ у разных испытуемых (рис. 3).

При воображении сгибания пальцев правой руки у испытуемого А в альфа2 диапазоне ЭЭГ обнаружена реакция синхронизации в теменно-затылочных и двигательных зонах коры больших полушарий и реакция десинхронизации в лобно-височных областях. В то время как у испытуемого Б при воображении сгибания пальцев правой руки преобладала только реакция

синхронизации в альфа2 диапазоне ЭЭГ (в моторных, теменных, затылочных и височных областях) (рис. 3).

При воображении тыльного сгибания правой стопы у испытуемого А обнаружена реакция синхронизации в альфа1-, альфа2-, альфа3- и бета 2-ритмах ЭЭГ. А у испытуемого Б синхронизация обнаружена только в альфа3- и бета2-ритмах ЭЭГ. В альфа1 частотном диапазоне ЭЭГ у испытуемого Б в отличие от испытуемого А установлена реакция десинхронизации в центральных, левой фронтальной, правой париетально-темпоральной, правой париетально-окципитальной областях.

В качестве проявления индивидуальности ответов сенсомоторных ритмов ЭЭГ при воображении моновекторных движений в 4-х конечностях в наших исследованиях выявлена либо низкая, либо высокая межполушар-

Рисунок 2. Динамика средних значений мощности в частотных диапазонах ЭЭГ при воображении движений: 1 – сгибание пальцев правой руки; 2 – сгибание пальцев левой руки; 3 – тыльное сгибание правой стопы; 4 – тыльное сгибание левой стопы; 0 – фон.

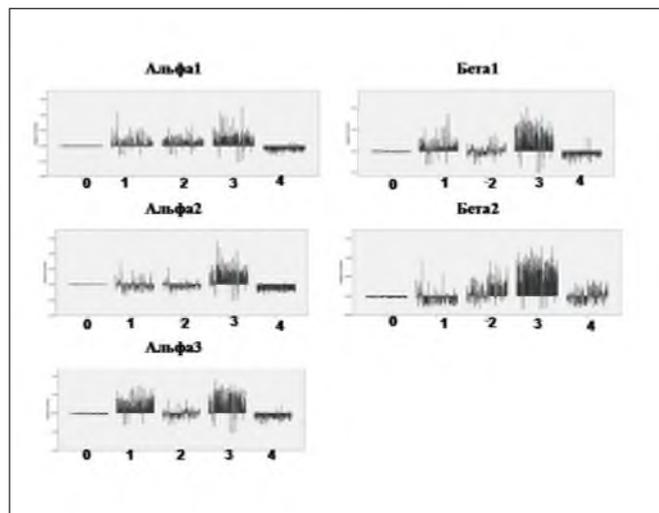
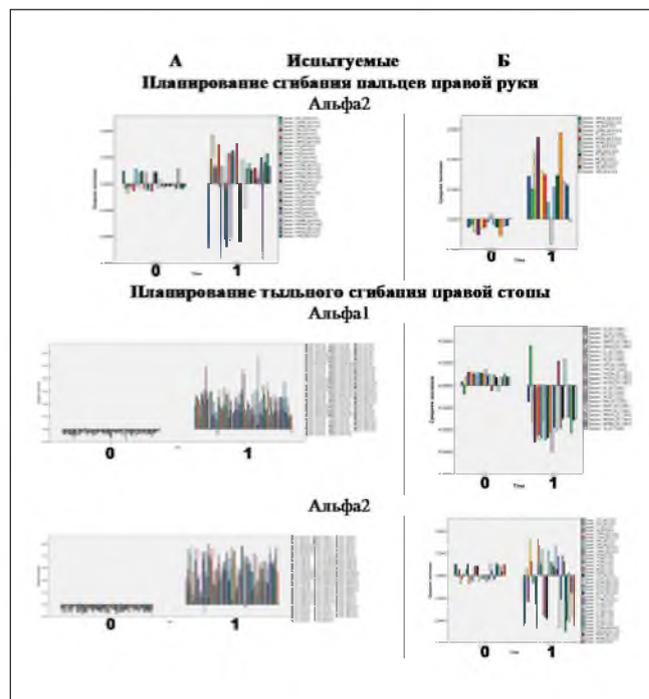


Рисунок 3. Динамика средних значений мощности в частотных диапазонах ЭЭГ при воображении движений испытуемых А и Б. 0- фон; 1 – планирование движения.



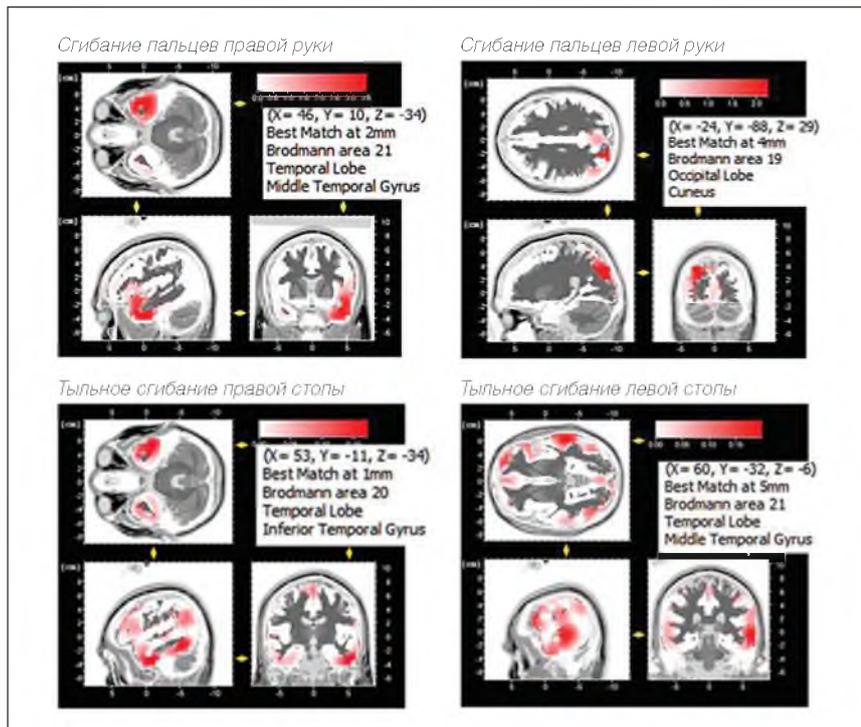


Рисунок 4. LORETA спектральная плотность при воображении одновекторных движений в верхних конечностях испытуемого С, в нижних конечностях испытуемого А.

ная асимметрия при воображении движений в верхних и нижних конечностях. Межполушарная асимметрия проявлялась в локализации источника максимальной

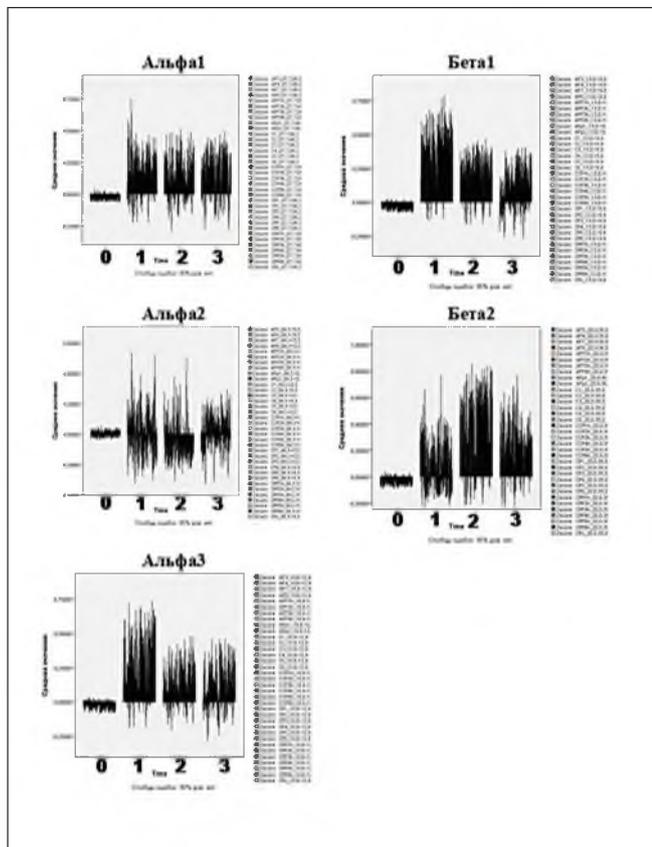


Рисунок 5. Динамика средних значений мощности в частотных диапазонах ЭЭГ при воображении трехвекторных движений в правой руке испытуемого Н. 0 — фон; 1 — сгибание пальцев, 2 — сгибание в локтевом суставе; 3 — ротация кисти.

активности (рис. 1, 4), в характере проявления ERD/ERS сенсомоторных ритмов ЭЭГ (рис. 2). ERD/ERS в сенсомоторных ритмах ЭЭГ была более выражена при воображении движений в доминантных конечностях (правой руке и в правой ноге), чем в недоминантных.

Описанные результаты позволяют сделать заключение о том, что при воображении моновекторных движений в доминантных и недоминантных конечностях имеет место полиморфизм ERD/ERS в сенсомоторных ритмах ЭЭГ, но индивидуальные особенности их проявлений открывают возможности их использования в качестве команд для целей ИМК.

Анализ ЭЭГ при воображении трехвекторных движений в доминантной руке.

Поскольку метод ЭЭГ обладает невысоким пространственным разрешением, то дифференцировать

сигналы различных воображаемых движений в одной конечности становится гораздо труднее, поскольку в этом случае активируются близко расположенные участки первичной двигательной коры [6]. В нашем исследовании по паттернам ЭЭГ обнаружена низкая дифференцировка воображаемых трехвекторных движений (сгибание пальцев, сгибание в локтевом суставе, ротация кисти) в доминантной руке (рис. 5). Воображение всех трех типов движений в доминантной руке сопровождалось практически одинаково выраженной ERD/ERS в сенсомоторных ритмах.

Таким образом, в работе не установлена значимость изменений мощности сенсомоторных ритмов ЭЭГ для дифференцирования 3-х степеней свободы при воображении движений в одной конечности. В то же время после моделирования 900 двигательных паттернов в течение 30 сек. на аппарате для реабилитации PowerPlate [7, 8] нами установлена возможность четкой дифференцировки изменений мощности сенсомоторных ритмов ЭЭГ двухвекторных воображаемых движений (сгибание пальцев, сгибание в локтевом суставе) доминантной руки [9].

■ ВЫВОДЫ

1. Воображение моно- и двухвекторных движений конечностей отражается дискретными паттернами в сенсомоторных ритмах ЭЭГ.

2. Во время воображения моновекторных движений в доминантных и недоминантных конечностях имеет место полиморфизм ERS/ERD в сенсомоторных ритмах ЭЭГ, но индивидуальные особенности их проявлений открывают возможности их использования в качестве команд для целей ИМК. ■

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Пятин В.Ф., Колсанов А.В., Сергеева М.С., Захаров А.В., Антипов О.И., Коровина Е.С., Тюрин Н.Л., Глазкова Е.Н. Информационные возможности использования мю- и бета-ритмов ЭЭГ доминантного полушария в конструировании нейрокомпьютерного интерфейса. *Фундаментальные исследования*. 2015;2(5):975-978.

Pyatin VF, Kolsanov AV, Sergeeva MS, Zaharov AV, Antipov OI, Korovina ES, Tyurin NL, Glazkova EN. Information possibilities of using mu and beta EEG rhythms of the dominant hemisphere in the designing of brain-computer interface. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2015;2(5):975-978. (In Russ.).

2. Хивинцева Е.В., Сергеева М.С., Пятин В.Ф., Колсанов А.В., Захаров А.В., Антипов О.И., Коровина Е.С. Динамика сенсомоторной активности коры головного мозга при интенции движения. *Нейрокомпьютеры: разработка, применение*. 2016;(6):40-43.

Hivinceva EV, Sergeeva MS, Pyatin VF, Kolsanov AV, Zaharov AV, Antipov OI, Korovina ES. Dynamics of sensorimotor cortex activity during an intention movement. *Neirokomp'yutery: razrabotka, primeneniye*. 2016;(6):40-43. (In Russ.).

3. Gao Q, Duan X, Chen H. Evaluation of effective connectivity of motor areas during motor imagery and execution using conditional Granger causality. *NeuroImage*. 2011;54(2):1280-1288. doi:10.1016/j.neuroimage. 2010.08.071. PMID: 20828626

4. McFarland DJ, Sarnacki WA, Wolpaw JR. Effects of training pre-movement sensorimotor rhythms on behavioral performance. *J Neural Eng*. 2015;12(6):066021. doi: 10.1088/1741-2560/12/6/066021. PMID: 26529119

5. La Fleur K, Cassady K, Doud A, Shades K, Rogin E, He B. Quadcopter control in three-dimensional space using a noninvasive motor imagery-based brain-computer interface. *Journal of Neural Engineering*. 2013; 10(4):1-15. doi: 10.1088/1741-2560/10/4/046003. PMID: 23735712

6. Plow EB, Arora P, Pline MA, Binstock MT, Carey JR. Within-limb somatotopy in primary motor cortex—revealed using fMRI.

Cortex. 2010;46(3):310-321. doi: 10.1016/j.cortex.2009.02.024 PMID:19446804

7. Пятин В.Ф., Сергеева М.С., Королев В.В., Коровина Е.С., Лавров О.В. Увеличение мощности дельта-ритма ЭЭГ после физической нагрузки на тренажере Power Plate. *Вестник ТвГУ. Серия Биология и экология*. 2012;(28):7-21.

Pyatin VF, Sergeeva MS, Korolev VV, Korovina ES, Lavrov OV. Increasing the power of EEG delta rhythm after exercise on the simulator Power Plate. *Vestnik TvGU. Seriya Biologiya i ekologiya*. 2012;(28):7-21. (In Russ.).

8. Пятин В.Ф., Сергеева М.С., Коровина Е.С., Шалдыбина Ю.Э., Меркулова С.В. Активация проприоцептивной сенсорной системы уменьшает проявления психологического стресса у студентов. *Современные проблемы науки и образования*. 2014;(6); URL: <http://www.science-education.ru/120-15512> (дата обращения: 23.11.2014).

Pyatin VF, Sergeeva MS, Korovina ES, Shaldibina YuE, Merkulova SV. Activation of the proprioceptive sensory system reduces the manifestations of psychological stress among students. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*. 2014;(6); URL: <http://www.science-education.ru/120-15512> (date of the application: 23.11.2014). (In Russ.).

9. Сергеева М.С., Пятин В.Ф., Колсанов А.В., Захаров А.В., Антипов О.И., Коровина Е.С. Модуляция сенсомоторных ритмов ЭЭГ. *Биомедицинская радиоэлектроника. По материалам XII Международного междисциплинарного конгресса и Научной школы «Нейронаука для медицины и психологии. Новейшие разработки в фундаментальных и прикладных нейроисследованиях и психологии»*. 2016;5(2):28-30.

Sergeeva MS, Pyatin VF, Kolsanov AV, Zaharov AV, Antipov OI, Korovina ES. Modulation of sensorimotor EEG rhythms. *Biomeditsinskaya radioelektronika. Po materialam XII Mezhdunarodnogo mezhdistsiplinarnogo kongressa i Nauchnoi shkoly «Neironauka dlya meditsiny i psikhologii. Noveishie razrabotki v fundamental'nykh i prikladnykh neuroissledovaniyakh i psikhologii»*. 2016;5(2):28-30. (In Russ.).

■ Участие авторов:

Концепция и дизайн исследования: Пятин В.Ф., Колсанов А.В., Сергеева М.С., Захаров А.В.

Сбор и обработка материала: Сергеева М.С., Коровина Е.С.

Статистическая обработка: Сергеева М.С., Коровина Е.С.

Написание текста: Сергеева М.С., Пятин В.Ф., Коровина Е.С.

Редактирование: Пятин В.Ф., Захаров А.В.

Конфликт интересов отсутствует.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Пятин В.Ф. — д.м.н., профессор, заведующий кафедрой физиологии с курсом БЖД и медицины катастроф, начальник отдела нейроинтерфейсов и прикладной нейрофизиологии ЦПИ «Информационные технологии в медицине».

E-mail: pyatin_vf@list.ru

Колсанов А.В. — д.м.н., профессор, директор Института инновационного развития СамГМУ.
E-mail: avkolsanov@mail.ru

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Pyatin VF — PhD, professor, Head of the Department of Physiology with the course of life safety and medicine of catastrophes SSMU, Head of the Department of Neurointerface and Applied Neurophysiology of the Center for breakthrough research «IT in Medicine», Samara State Medical University.

E-mail: pyatin_vf@list.ru

Kolsanov AV — PhD, professor, director of the Institute of innovative development of Samara State Medical University.
E-mail: avkolsanov@mail.ru

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Сергеева М.С. — к.биол.н., доцент кафедры физиологии с курсом БЖД и медицины катастроф, заведующая лабораторией прикладной нейрофизиологии ЦПИ «Информационные технологии в медицине» СамГМУ.
E-mail: marsergr@yandex.ru

Коровина Е.С. — аспирант кафедры физиологии с курсом БЖД и медицины катастроф СамГМУ.
E-mail: korovina_ekateri@mail.ru

Захаров А.В. — к.м.н., доцент кафедры неврологии и нейрохирургии, заведующий лабораторией нейроинтерфейсов ЦПИ «Информационные технологии в медицине» СамГМУ.
E-mail: zakharov1977@mail.ru

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Segreeva MS — PhD, associate professor of the Department of Physiology with the course of life safety and medicine of catastrophes SSMU, Head of the Laboratory of Applied Neurophysiology of the Center for breakthrough research «IT in Medicine», Samara State Medical University.
E-mail: marsergr@yandex.ru

Korovina ES — postgraduate student at the Department of Physiology with the course of life safety and medicine of catastrophes, Samara State Medical University.
E-mail: korovina_ekateri@mail.ru

Zakharov AV — PhD, associate professor of the Department of Neurology and Neurosurgery, Head of the Laboratory of Neurointerface of the Center for breakthrough research «IT in Medicine», Samara State Medical University.
E-mail: zakharov1977@mail.ru

■ Контактная информация**Коровина Екатерина Сергеевна**

Адрес: кв. 85, ул. Фадеева, 59, Самара, Россия, 443081.

E-mail: korovina_ekateri@mail.ru.

Тел.: + 7 (927) 206 83 09

■ Contact information**Korovina Ekaterina Sergeevna**

Address: ap. 85, 59 Fadeev st., Samara, Russia, 443081.

E-mail: korovina_ekateri@mail.ru

Tel.: + 7 (927) 206 83 09