

УДК 612.812.2

СЕНСОМОТОРНАЯ ПОТЕНЦИАЦИЯ ДВИГАТЕЛЬНОГО ВООБРАЖЕНИЯ КАК АКТИВАТОР ПЛАСТИЧНОСТИ ЦНС

SENSORIMOTOR POTENTIATION OF MOTOR IMAGINATION AS CNS PLASTICITY ACTIVATOR

Коровина Е.С.
Глазкова Е.Н.
Шиrolapov И.В.
Кузнецова О.Г.
Ханбиков Н.Р.
Горнякова И.С.

Korovina ES
Glazkova EN
Shirolapov IV
Kuznetsova OG
Khanbikov NR
Gornyakova IS

ФГБОУ ВО «Самарский государственный
медицинский университет» Минздрава России

Samara State
Medical University

Цель исследования — выявить нейрофизиологические корреляты двигательного воображения после моделирования двигательного паттерна.

Материалы и методы. ЭЭГ отводили монополярно с помощью «Нейрон — Спектр — 4/ВПМ» у 7 добровольцев-правшей в возрасте 18-19 лет. Унилатеральную ЭЭГ регистрировали по системе 10-5 в области проекции сенсомоторной коры левого полушария во время воображения двух движений в правой руке (сгибание пальцев и сгибание в локтевом суставе) до и после 30-секундного моделирования двигательного паттерна с помощью аппарата для реабилитации Power Plate.

Результаты. После моделирования двигательного паттерна воображение двух видов движения коррелирует с десинхронизацией альфа-, бета-ритмов ЭЭГ, увеличением числа отведений с реакцией десинхронизации ($p \leq 0,01$) и достоверной дифференцировкой изменения мощности сенсомоторных ритмов ЭЭГ двухвекторных воображаемых движений, а также ускорением обучения испытуемых двигательному воображению.

Заключение. Сенсомоторная потенция способствует выявлению нейрофизиологических коррелятов двигательного воображения.

Ключевые слова: сенсомоторные ритмы ЭЭГ, сенсомоторная потенция, двигательное воображение, система 10-5.

Aim — to find out the neurophysiological correlatives of motor imagery after the simulation of the motor pattern.

Materials and methods. Monopolar EEG was recorded using EEG recording system Neuron - Spectrum - 4 / VPM at 7 right-handed volunteers aged 18-19 years. EEG was recorded according to the system 10-5 in the projection of the sensorimotor cortex of the left hemisphere during the imagination of two movements in the right hand (flexing the fingers, elbow flexion) before and after 30 seconds of simulation of movement patterns using the rehabilitation device Power Plate.

Results. After the simulation of the motor pattern, the imagination of the two types of movement correlated with desynchronization of alpha-, beta- EEG rhythms, increasing the number of leads with the reaction of desynchronization ($p \leq 0,01$) and reliable differentiation of changes in the power of sensorimotor EEG rhythms at dual-track imaginary movements, and the accelerated learning of motor imagination.

Conclusion. Sensorimotor potentiation helps to find out the neurophysiological correlatives of motor imagery.

Keywords: EEG sensorimotor rhythms, sensorimotor potentiation, motor imagery, system 10-5.

ВВЕДЕНИЕ

Значительные перспективы в разработке и применении интерфейса «мозг-компьютер» (ИМК) связаны с активацией пластичности мозга и использованием паттернов сенсомоторных ритмов ЭЭГ воображаемых движений в качестве управляющего сигнала. Двигательное воображение позволяет человеку выполнять моторные действия в уме, без фактического выполнения таких действий через активацию мышц [1,

2], при этом активируются нейронные сети, частично перекрывающиеся с нейронными сетями, задействованными при реальном выполнении движений. По этой причине двигательное воображение используется для тренировки спортсменов, обучения музыкантов, в реабилитации после инсульта [3], а также в технологиях ИМК. Моторное воображение является сознательным и преднамеренным процессом, в то время как фактическое выполнение движения включает в себя в основном скрытые и бессознательные процессы, во-

	Частотные диапазоны ЭЭГ	Условия регистрации		
		Без преактивации	После преактивации в Low режиме	После преактивации в High режиме
Воображение сгибания в локтевом суставе правой руки	Альфа1	0,653 ± 0,025	0,696 ± 0,021	0,704 ± 0,025
	Альфа2	0,639 ± 0,016	0,684 ± 0,016	0,705 ± 0,021
	Бета1	0,637 ± 0,017	0,677 ± 0,013	0,697 ± 0,018
	Бета2	0,635 ± 0,016	0,672 ± 0,012	0,693 ± 0,017
Воображение сгибания пальцев правой руки	Альфа1	0,666 ± 0,022	0,740 ± 0,015	0,763 ± 0,003
	Альфа2	0,616 ± 0,016	0,731 ± 0,009	0,759 ± 0,005
	Бета1	0,611 ± 0,016	0,722 ± 0,009	0,754 ± 0,006
	Бета2	0,612 ± 0,016	0,721 ± 0,009	0,750 ± 0,008

Таблица 1. Среднее значение площади под ROC-кривой в сенсомоторных ритмах ЭЭГ при воображении движений в правой руке ($M \pm m$)

влеченные в организацию и координацию действия. Ментальные образы от первого лица с преобладанием кинестетического ощущения предпочтительны для получения управляющего сигнала ERS/ERD сенсомоторных ритмов в ИМК [4], поскольку такое воображение задействует сенсомоторные области коры головного мозга, в то время как визуальные двигательные образы активируют затылочные и ассоциативные зоны [5].

Сенсомоторная потенциация нами рассматривается как один из ключевых механизмов повышения качества сигнала — паттернов сенсомоторных ритмов ЭЭГ воображаемых движений.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследование паттернов сенсомоторных ритмов ЭЭГ при воображении движений в доминантной руке в условиях сенсомоторной потенциации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе приняли участие 7 испытуемых-правшей в возрасте 18-19 лет, давших информированное согласие на участие в исследовании. ЭЭГ регистрировалась монополярно с помощью системы «Нейрон — Спектр — 4/ВПМ». 17 ЭЭГ электродов были локализованы по системе 10-10 в проекциях первичных, вторичных моторных и соматосенсорных зон левого полушария.

Частота квантования ЭЭГ составляла 200 Гц, пределы фильтрации от 0 до 35 Гц, чувствительность 5 мкВ. Использовался Notch фильтр для подавления наводки электричества бытовой сети. Импеданс всех каналов был ниже 20 кОм.

Во время записи ЭЭГ испытуемые находились в темной звукоизолированной комнате с закрытыми глазами в положении сидя.

ЭЭГ регистрировалась во время планирования движений в доминантной руке (сгибание в пястно-фаланговых и межфаланговых суставах, сгибание в локтевом суставе) до (без преактивации) и после моделирования двигательного паттерна (после преактивации) в доминантной руке с помощью аппарата для реабилитации Power Plate [6, 7, 8]. Физическая нагрузка на аппарате Power Plate осуществлялась при частоте движения платформы 30 Гц при двух режимах ее ускорения — 18 м/с² (Low)

и 31 м/с² (High). Оба фактора воздействуют на проприоцептивную систему человека в условиях трёхмерного движения платформы тренажера Power Plate.

Испытуемые выполняли по одному упражнению (сгибание пальцев или сгибание в локтевом суставе) в течение одного эксперимента в двух режимах (Low и High) на аппарате для реабилитации Power Plate длительностью 30 сек. Для моделирования сгибания пальцев ручка ремня, связанного с платформой аппарата для реабилитации Power Plate, фиксировалась на первых фалангах ладонной поверхности кисти правой руки испытуемого, сидевшего в ЭЭГ-кресле. Испытуемый при этом производил сжатие кисти в кулак. В этих условиях инициировалось рефлекторное сокращение экстрафузальных мышечных волокон преимущественно мышц предплечья правой руки с частотой 30 Гц. Для моделирования сгибания в локтевом суставе ручка ремня аппарата Power Plate фиксировалась на предплечье правой руки испытуемого, сидевшего в ЭЭГ-кресле. Испытуемый при этом производил сгибание в локтевом суставе. В этих условиях инициировалось рефлекторное сокращение преимущественно бицепса правой руки.

После окулографической фильтрации ICA с помощью MatLab ЭЭГ разделялась на отдельные частотные диапазоны: дельта (0,3-3,9 Гц), тета 1 (4,0-4,9 Гц), тета 2 (5,0-7,9 Гц) альфа 1 (8,0-10,0 Гц), альфа 2 (10,1-12,9 Гц), бета 1 (13,0-19,9 Гц), бета 2 (20,0-35,0 Гц). Были использованы непараметрические и регрессионные методы статистического анализа вызванной реакции десинхронизации/синхронизации (ERD/ERS) сенсомоторных

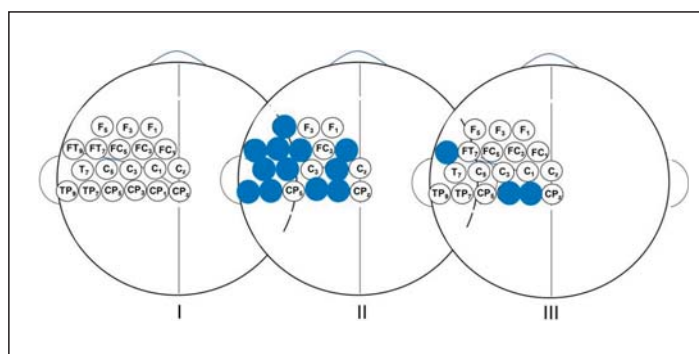


Рисунок 1. Локализация достоверных ЭЭГ электродов ($p \leq 0,05$) в альфа2-частотном диапазоне ЭЭГ испытуемого С при воображении сгибания пальцев правой руки без проприоцептивной преактивации (I), после преактивации в Low режиме (II), после преактивации в High режиме (III).

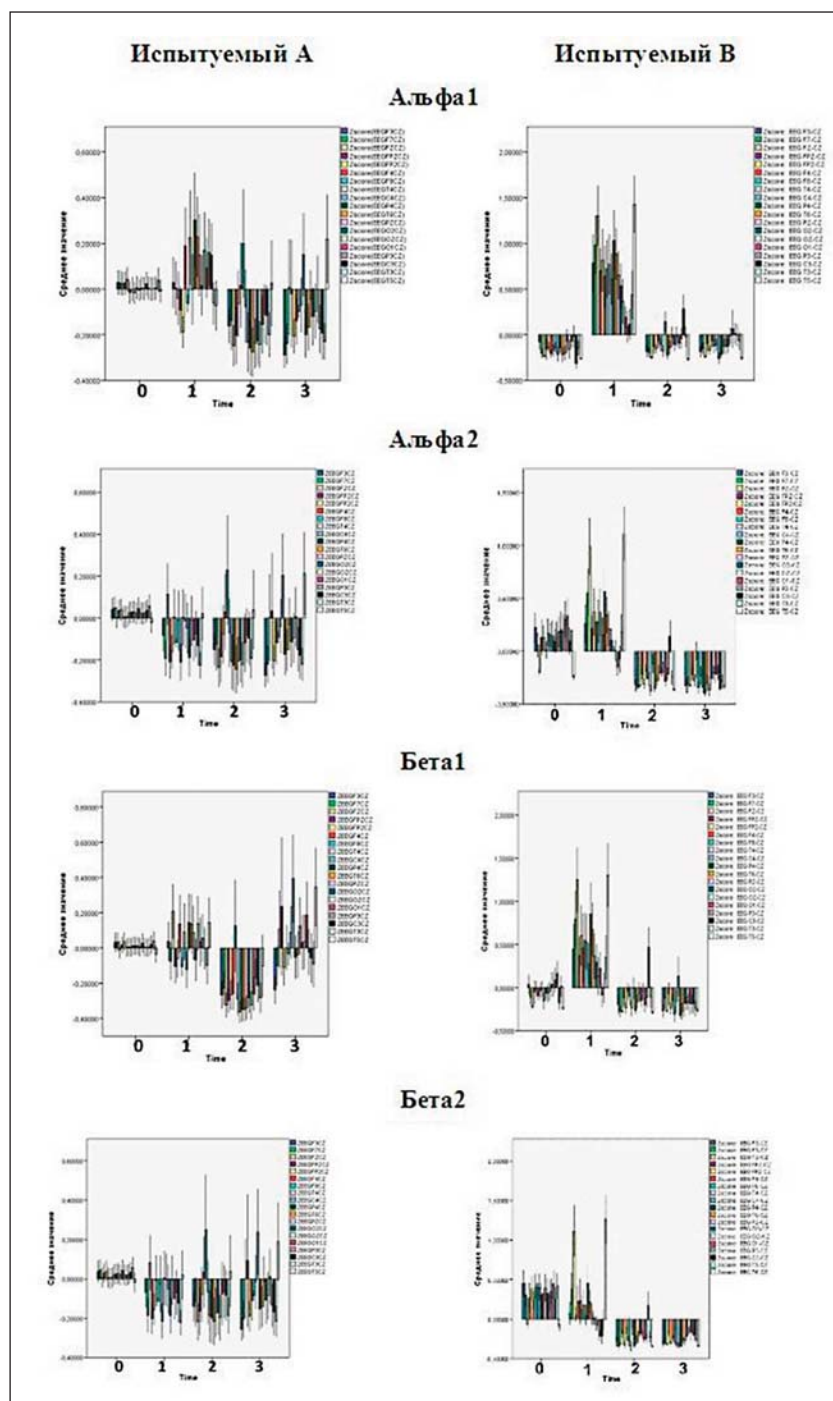


Рисунок 2. Динамика изменения мощности в сенсомоторных ритмах ЭЭГ у испытуемых А и В при воображении сгибания правой руки в локтевом суставе. Цифрами обозначены: 0 – фон, 1 – без проприоцептивной преактивации, 2 – после преактивации в Low режиме, 3 – после преактивации в High режиме.

ритмов (альфа 1, альфа 2, бета 1, бета 2) ЭЭГ с помощью IBM SPSS Statistics 22.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При воображении движений в верхней конечности после унилатеральной проприоцептивной стимуляции нами установлено достоверное увеличение площади под ROC кривой сенсомоторных ритмов ЭЭГ (табл. 1). Наиболее выраженной данная тенденция была после проприоцептивной стимуляции мышц правой руки в High режиме.

После унилатеральной проприоцептивной стимуляции при воображении движений в верхней конечности нами установлено расширение очага активации моторных и соматосенсорных центров коры головного мозга. Нами отмечалось увеличение количества достоверных ЭЭГ-отведений ($p \leq 0,05$), особенно после преактивации в Low режиме (рис. 1).

Вызванная реакция десинхронизации сенсомоторных ритмов ЭЭГ при воображении движений после моделирования двигательного паттерна была больше по сравнению с изменениями мощности альфа- и бета-ритмов ЭЭГ при воображении движений без преактивации [9, 10]. Высокоинтенсивная проприоцептивная стимуляция рассматривается нами как вариант сенсомоторной посттетанической потенциации, активирующей механизмы нейропластичности. По литературным данным высокочастотная стимуляция может вызвать посттетаническое потенцирование синаптической передачи в течение нескольких минут во многих синапсах и связано с активацией кальций-зависимой протеинкиназы C, что увеличивает количество выпущенных везикул за счет увеличения вероятности выхода и / или готового к экзоцитозу размера пула медиатора [11].

Одним из актуальных вопросов в разработке ИМК является увеличение количества степеней свободы. Но поскольку метод ЭЭГ обладает невысоким пространственным разрешением, дифференцировать сигналы различных воображаемых движений в одной конечности становится гораздо труднее: в этом случае активируются близко расположенные участки первичной двигательной коры. При воображении движений без предварительного моделирования двигательного паттерна нами обнаружена низкая дифференцировка воображаемых двухвекторных движений (сгибание пальцев, сгибание в локтевом суставе) в доминантной руке (рис. 3).

Воображение данных типов движений в доминантной руке сопровождалось практически одинаково выраженной ERD/ERS в сенсомоторных ритмах. В то же время после моделирования двигательных паттернов в течение 30 сек на аппарате для реабилитации Power Plate нами установлена возможность четкой дифференцировки изменений мощности сенсомоторных ритмов ЭЭГ двухвекторных воображаемых движений доминантной руки.

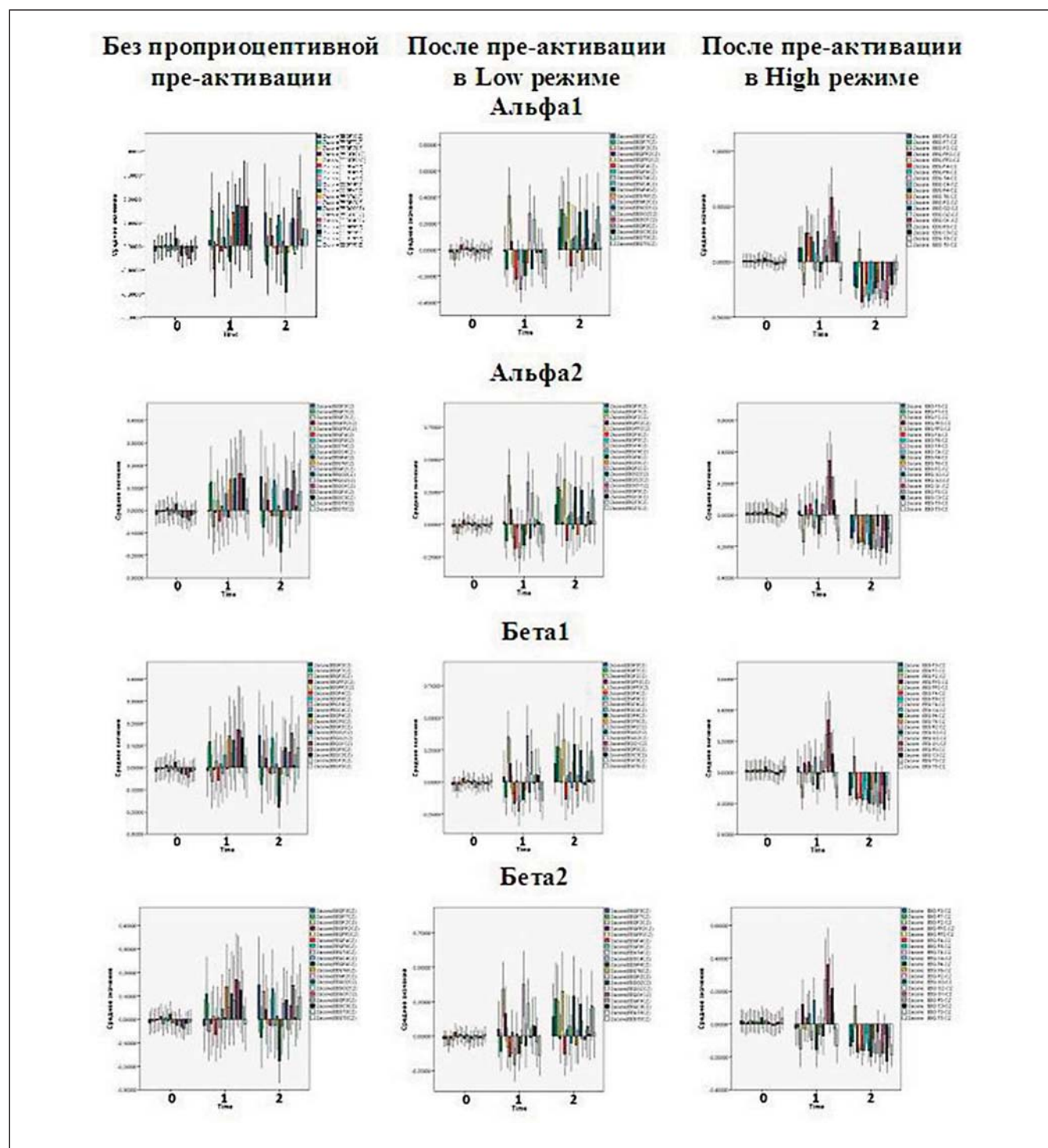


Рисунок 3. Динамика изменения мощности в сенсомоторных ритмах ЭЭГ у испытуемого В при воображении движений в правой руке без проприоцептивной преактивации и после преактивации (в Low и High режимах). Цифрами обозначены: 0 – фон, 1 – при воображении сгибании пальцев, 2 – при воображении сгибания в локтевом суставе.

■ ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При воображении движений в правой руке после унилатеральной проприоцептивной стимуляции нами установлено: увеличение ERD сенсомоторных ритмов, расширение очага активации моторных и соматосенсорных центров коры головного мозга, возможность дифференцировки изменений мощности сенсомоторных ритмов ЭЭГ двухвекторных планируемых движений в доминантной руке. После моделирования

двигательных паттернов при планировании движений отмечалось достоверное увеличение вероятности события в сенсомоторных ритмах ЭЭГ.

Сенсомоторная посттетаническая потенция, приводящая к увеличению информационной значимости ЭЭГ сигналов и быстрой функциональной перестройке (рекрутировке) в активности корковых областей при планировании движений, может ускорить процедуру обучения испытуемых навыку воображения движений и повысить эффективность интерфейса «мозг-компьютер». ■

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Moran A, Guillot A, MacIntyre T, Collet C. Re-imagining motor imagery: building bridges between cognitive neuroscience and sport psychology. *Br J Psychol.* 2012;103(2):224-47. doi: 10.1111/j.2044-8295.2011.02068.x PMID: 22506748
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.
3. 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. Schuster C, Hilfiker R, Amft O, Scheidhauer A, Andrews B, Butler J, Ettlin T. Best practice for motor imagery: a systematic literature review on motor imagery training elements in five different disciplines. *BMC Med.* 2011;17;9:75. doi: 10.1186/1741-7015-9-75 PMID: 21682867
4. Duann JR, Chiu JC. A comparison of independent event-related desynchronization responses in motor-related brain areas to movement execution, movement imagery, and movement observation. *PLoS One.* 2016;16;11(9):e0162546. doi: 10.1371/journal.pone.0162546. PMID: 27636359
5. Ridderinkhof KR, Brass M. How kinesthetic motor imagery works: a predictive-processing theory of visualization in sports and motor expertise. *J Physiol Paris.* 2015;109(1-3):53-63. doi: 10.1016/j.jphysparis.2015.02.003 PMID: 25817985
6. 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).
7. Pyatin VF, Sergeeva MS, Korovina ES, Shaldibina YuE, Merkulova SV. Activation of the proprioceptive sensory system reduces the manifestations of psychological stress among students. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya.* 2014 (6); URL: <http://www.science-education.ru/120-15512> (date of the application: 23.11.2014). (In Russ.).
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 PowerPlate. *Вестник ТвГУ. Серия Биология и экология.* 2012 (28):7-21.
8. 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. Сергеева М.С., Глазкова Е.Н. Активация проприоцептивной системы и циркадианных часов уменьшает проявления академического стресса у студентов медицинского вуза. *Современные педагогические и информационные технологии в образовании и медицине: сборник научных статей / под ред. академика РАН Г.П. Котельникова.* Самара: «Инсома-Пресс», 2015: 274-281.
9. Sergeeva MS, Glazkova EN. Activation of the proprioceptive system and circadian clock reduces the manifestations of academic stress among medical students. *Sovremennye pedagogicheskie i informacionnye tehnologii v obrazovanii i medicine: sbornik nauchnykh statej / pod red. akademika RAN G.P. Kotelnikova.* Samara: «Insoma-Press», 2015: 274-281 (In Russ.).
9. 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.
10. Pyatin VF, Kolsanov AV, Sergeeva MS, Zaharov AV, Antipov OI, Korovina ES, Tyurin NL, Glazkova EN. Information possibilities of using mu- and beta- rhythms EEG of the dominant hemisphere in the designing brain-computer interface. *Fundamental'nye issledovaniya.* 2015;2(5):975-978. (In Russ.).
10. 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.
11. 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.).
11. Xue L, Wu LG. Post-tetanic potentiation is caused by two signalling mechanisms affecting quantal size and quantal content. *J Physiol.* 2010; 15;588(Pt 24):4987-94. doi: 10.1113/jphysiol.2010.196964. PMID: 21041528

Участие авторов:

Концепция и дизайн исследования: Коровина Е.С., Глазкова Е.Н., Широлапов И.В.,

Сбор и обработка материалов: Коровина Е.С., Глазкова Е.Н.

Статистическая обработка: Ханбиков Н.Р., Горнякова И.С.

Написание текста: Коровина Е.С., Широлапов И.В., Кузнецова О.Г.

Редактирование: Коровина Е.С., Глазкова Е.Н.

Конфликт интересов отсутствует.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Глазкова Е.Н. — к.б.н., доцент кафедры физиологии с курсом БЖД и медицины катастроф.
E-mail: glazkova_en@list.ru

Шиrolapov И.В. — к.м.н., доцент кафедры физиологии с курсом БЖД и медицины катастроф.
E-mail: ishirolapov@mail.ru

Кузнецова О.Г. — старший преподаватель кафедры физиологии с курсом БЖД и медицины катастроф.
E-mail: olyakuznecova66@mail.ru

Ханбиков Н.Р. — студент 4 курса лечебного факультета СамГМУ.
E-mail: han1995.95@mail.ru

Горнякова И.С. — студентка 4 курса лечебного факультета СамГМУ.
E-mail: opachello@mail.ru

INFORMATION ABOUT AUTHORS

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

Glazkova EN — PhD (Biology), Associate Professor, Department of Physiology with the course of life safety and medicine of catastrophes SSMU.
E-mail: glazkova_en@list.ru

Shirolapov IV — PhD, Associate Professor, Department of Physiology with the course of life safety and medicine of catastrophes SSMU.
E-mail: ishirolapov@mail.ru

Kuznetsova OG — Senior Lecturer, Department of Physiology with the course of life safety and medicine of catastrophes SSMU.
E-mail: olyakuznecova66@mail.ru

Khanbikov NR — 4th year student of the Therapeutic Department of Samara State Medical University.
E-mail: han1995.95@mail.ru

Gornyakova IS — 4th year student of the Therapeutic Department of Samara State Medical University.
E-mail: opachello@mail.ru

■ Контактная информация

Коровина Екатерина Сергеевна
Адрес: кв.85, ул. Фадеева, 59,
г. Самара, 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