

**A MATHEMATICAL MODEL OF FUNCTIONAL CHANGES IN
INTERCORTICAL ACTIVITY UNDER VIRTUAL REALITY
CONDITIONS WITH PROPRIOCEPTIVE ACTIVATION**
Zakharov A.V.¹, Chaplygin S.S.², Rovnov S.V.³ (Russian Federation)
Email: Zakharov574@scientifictext.ru

¹Zakharov Alexander Vladimirovich – PhD in Medicine, Associate Professor;

²Chaplygin Sergei Sergeevich – PhD in Medicine, Associate Professor, Head,
LEADING RESEARCH CENTER;

³Rovnov Sergei Viktorovich – Head of Direction,
DIRECTION: NEUROREHABILITATION,
INSTITUTE FOR INNOVATIVE DEVELOPMENT,
LEADING RESEARCH CENTER,
FEDERAL STATE BUDGETARY EDUCATIONAL INSTITUTION
OF HIGHER PROFESSIONAL EDUCATION
SAMARA MEDICAL UNIVERSITY,
SAMARA

Abstract: *the article analyzes the changes in intercortical interaction upon activation of the peripheral sensorimotor apparatus in the context of personalized virtual reality. Mathematical models have been constructed based on coherent analysis of changes in the activity of the sensorimotor cortex of the brain, with ideomotor presentation of bimanual movements and bilateral movements of the lower extremities. Demonstrated pronounced changes in intercortical activity under conditions of multisensory virtual reality. The results obtained can be used as a way to increase the specificity and sensitivity of brain-computer interface algorithms for solving problems of motor rehabilitation.*

Keywords: *motor rehabilitation, virtual reality, mathematical model.*

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ
МЕЖКОРТИКАЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ В УСЛОВИЯХ
ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ ПРИ ПРОПРИОЦЕПТИВНОЙ
АКТИВАЦИИ**

Захаров А.В.¹, Чаплыгин С.С.², Ровнов С.В.³ (Российская Федерация)

¹Захаров Александр Владимирович – кандидат медицинских наук, доцент,

²Чаплыгин Сергей Сергеевич – кандидат медицинских наук, доцент, руководитель,
Лидирующий исследовательский центр;

³Ровнов Сергей Викторович – руководитель направления,
направление: нейрореабилитация,
институт инновационного развития,
Лидирующий исследовательский центр,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

Самарский государственный медицинский университет,

г. Самара

Аннотация: *в статье проводится анализ изменений в межкортикальном взаимодействии при активации периферического сенсомоторного аппарата в условиях персонализированной виртуальной реальности. Построены математические модели, на основе когерентного анализа изменений в активности сенсомоторной коры головного мозга, при идеомоторном представлении бимануальных движений и билатеральных движений нижних конечностей. Продемонстрированы выраженные изменения в межкортикальной активности в условиях мультисенсорной виртуальной реальности. Полученные результаты могут быть*

использованы в качестве способа увеличения специфичности и чувствительности алгоритмов интерфейса мозг-компьютер для решения задач двигательной реабилитации.

Ключевые слова: *двигательная реабилитация, виртуальная реальность, математическая модель.*

Введение: Двигательная реабилитация пациентов с поражением центрального мотонейрона остается ведущей и нерешенной проблемой современной медицины. Заболевания, сопровождающиеся поражением верхнего мотонейрона, являются основной причиной стойкой инвалидизации. Продолжается поиск эффективных методов нейрореабилитации активизирующих различные процессы нейропластичности.

В качестве интерфейса, позволяющего осуществлять персонализированный подход в реабилитации и моделировать условия в зависимости от решаемых задач двигательной реабилитации, может выступать иммерсивная среда – виртуальная реальность (VR) [1]. VR является одним из эффективных способов увеличения длительности эффективного периода реабилитации [2, 3].

В качестве основных процессов нейропластичности на которые может оказывать воздействие реабилитационные мероприятия реализованные с использованием VR являются: обучение Хебба, изменение баланса между активирующими и тормозящими нейромедиаторами, снижение активности ГАМК-ергических нейронов, активация связей между отдельными участками коры головного мозга, неактивных ранее [4, 5]. Доказательством активации процессов нейропластичности является изменения регистрируемые по данным электроэнцефалографии и магнитоэнцефалографии, демонстрирующие изменения мощности определенных спектров, изменение корреляций между отдельными корковыми центрами, выявляемых с помощью когерентного анализа [6, 7].

Эффекты воздействия на процессы нейропластичности, выявляемые с помощью ЭЭГ и связанные с активацией связей, не имеющих высокой активности в обычном состоянии, может быть увеличен за счет мультисенсорного насыщения в VR [8]. Использование мультисенсорного взаимодействия с объектами VR демонстрирует более значимые эффекты, как со стороны изменений, регистрируемых нейрофизиологическими методами, так и со стороны реабилитационного эффекта [9, 10]. Однако, не достаточно данных относительно изменений регистрируемых при идеомоторном представлении сложных движений, которые, также могут быть одним из методов активации процессов нейропластичности, реализованных в реабилитационных занятиях на основе идеомоторного тренинга.

Материалы и методы:

В исследовании приняли участие 31 здоровый доброволец в возрасте от 18 до 20 лет (средний возраст 18,2 года). Проводилась регистрации ЭЭГ с помощью усилителя BrainAmp («Brain Products», Germany, EC) в 128 отведениях. При регистрации испытуемый сидел в кресле с надетыми очками VR Oculus Rift S («Oculus», USA). Испытуемым демонстрировался визуальный ряд (бимануальное одномоментное движение верхних конечностей в виде флексорных/экстензорных движений в локтевых суставах с частотой 5 Гц и ходьбе по горизонтальной поверхности со скоростью 5 км/ч). Испытуемые должны были осуществлять идеомоторное представление данных движений до и после активации периферического сенсомоторного аппарата. Активация периферического сенсомоторного аппарата осуществлялась с помощью вибрационного воздействия с частотой 30 Гц, за счет использования платформы Power Plate («Performance Health Systems, LLC», USA). Отдельно проведена экспериментальная сессия по получению математической модели динамики межкортикальных взаимодействий до и после проприоцептивной активации на фоне вибрационного воздействия для верхних и нижних конечностей.

Результаты полученные в рамках реализации программы деятельности Лидирующего исследовательского центра, реализующего дорожную карту по "сквозной" цифровой технологии "Технологии виртуальной и дополненной реальности" при финансовой поддержке Минкомсвязи России и АО "РВК" (Договор о предоставлении гранта № 003/20 от

Результаты:

Полученные в ходе экспериментальных сессии ЭЭГ данные были подвержены очистке от двигательных артефактов, использования notch-фильтрации, удаления окулографического артефакта методом независимых компонент. Полученные данные были подвергнуты вейвлет преобразованию с помощью:

Комплексного вейвлета Морле:

$$\psi(t) = \pi^{-\frac{1}{4}} \left(e^{i\omega_0 t} - e^{-\frac{1}{2}\omega_0^2 t} \right) e^{-\frac{1}{2}t^2} \quad [1]$$

Комплексного вейвлета МНАТ:

$$\psi_{\text{real}}(t) = (1 - (\pi t f_0)^2) e^{-\frac{1}{2}(2\pi t f_0)^2} = (1 - \tau^2) e^{-\frac{1}{2}\tau^2} \quad [2]$$

С последующей визуализацией полученных данных в результате применения комплексного непрерывного вейвлет-преобразования:

$$\Psi_{\text{imag}}(t) = A * \left\{ 2 \frac{\tau}{\sqrt{2}} + \sqrt{\pi} \left[\operatorname{erfi} \left(\frac{\tau}{\sqrt{2}} \right) e^{-\frac{1}{2}\tau^2} (1 - \tau^2) \right] \right\} \quad [3]$$

В последующем проводился когерентный (нормализованный кросс-спектральный) анализ.

$$C_{xy}(f) = \frac{\langle S_{xy}(f) \rangle}{\sqrt{\langle S_{xx}(f) \rangle \langle S_{yy}(f) \rangle}} \quad [4]$$

Где $\langle \rangle$ соответствует усреднению по испытаниям, S_{xy} - кросс-спектральная плотность между двумя сигналами, а S_{xx} и S_{yy} - автоспектральные плотности для сигналов x и y. Когерентность определяется согласно формуле:

$$\operatorname{Coh}_{xy}(f) = |C_{xy}(f)| = \left| \frac{\langle S_{xy}(f) \rangle}{\sqrt{\langle S_{xx}(f) \rangle \langle S_{yy}(f) \rangle}} \right| \quad [5]$$

как величина когерентности. Предполагаемая когерентность для данной частоты находится в диапазоне от 0 до 1. Значение 0 указывает, что два сигнала совершенно не коррелированы, а значение 1 указывает на полную корреляцию. Это также показатель ненаправленной связности, то есть $\operatorname{Coh}_{xy}(f) = \operatorname{Coh}_{yx}(f)$.

В результате получены статистические коннектомы межкортикального взаимодействия для идеомоторного бимануального движения и билатерального движения нижних конечностей (Рис. 1 и 2).

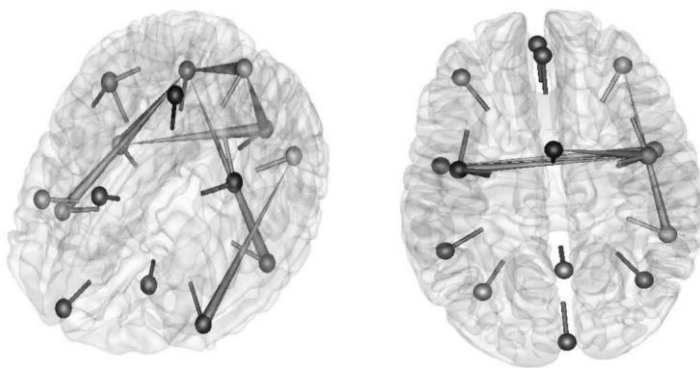


Рис. 1. Корреляционные межкортикальные зависимости при идеомоторном представлении бимануальных флексорных/экстензорных движений в локтевом суставе. Слева - до активации периферического сенсомоторного аппарата, справа - после активации

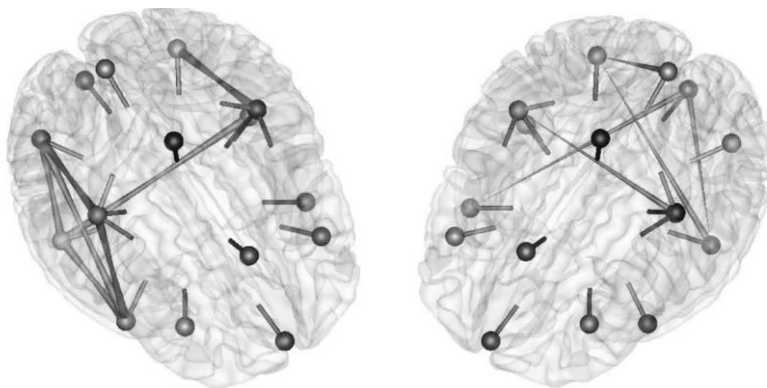


Рис. 2. Корреляционные межкортикальные зависимости до и после активации периферического сенсомоторного аппарата при идеомоторном представлении билатерального движения «ходьбы». Слева - до активации периферического сенсомоторного аппарата, справа - после активации

Согласно полученным данным после активации периферического сенсомоторного аппарата обнаружено увеличение корреляции между кортикальными центрами сенсомоторной области. При этом, значительно снижается корреляция активности затылочной области, ответственной за обработку зрительной информации. Активация под электродами, локализованных в проекции сенсомоторной области после вибрационного воздействия, свидетельствует об улучшении идеомоторного представления бимануального движения (Рис. 1) и билатерального движения нижних конечностей (Рис. 2).

Обсуждение:

Активация проприоцептивного аппарата в условиях иммерсивной среды выступает как фактор, улучшающий возможность идеомоторного представления движений. Полученные математические модели описывающие межкортикальные корреляции могут быть использованы в основе для выбора целевых зон коры головного мозга, активность которых может быть использована при классификации в работе интерфейса мозг-компьютер.

Список литературы / References

1. Laver K.E., Lange B., George S., Deutsch J.E., Saposnik G., Crotty M. Virtual reality for stroke rehabilitation // Cochrane Database of Systematic Reviews, 2017. Vol. 217.
2. Ko Y., Ha H., Bae Y.-H., Lee W. Effect of space balance 3D training using visual feedback on balance and mobility in acute stroke patients // Journal of Physical Therapy Science, 2015. Vol. 27. № 254. P. 1593–1596.
3. Borra E., Luppino, G. (2017). Functional anatomy of the macaque temporo-parieto-frontal connectivity // Cortex, 2017. № 97. P. 306–326.
4. Alia C., Spalletti C., Lai S., Panarese A., Lamola G., Bertolucci F., et al. Neuroplastic Changes Following Brain Ischemia and their Contribution to Stroke Recovery: Novel Approaches in Neurorehabilitation // Frontiers in Cellular Neuroscience, 2017. Vol. 11. № 76.
5. Winstein C.J., Stein J., Arena R., Bates B., Chorney L.R., Cramer S.C. et al. (2016). Guidelines for Adult Stroke Rehabilitation and Recovery // Stroke, 2016. Vol. 47.
6. Пятин В.Ф., Колсанов А.В., Сергеева М.С., Коровина Е.С., Захаров А.В. Изменения паттернов сенсомоторных ритмов ЭЭГ при двигательном воображении // Наука и инновации в медицине, 2016. Т 1. № 1. С. 46-51.
7. Borra E., Luppino G. (2017). Functional anatomy of the macaque temporo-parieto-frontal connectivity // Cortex, 2017. № 97. P. 306–326.
8. Bulanov V.A., Zakharov A.V., Chaplygin S.S. Solving classification problems of visual evoked potentials for the brain-computer interfaces // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., 2020. Vol. 862.

9. *Bulanov V.A., Zakharov A.V., Khivintseva E. V.* Wavelet transform for the identification of P300 // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., 2020. Vol. 862.
10. *Zakharov A.V., Bulanov V.A., Khivintseva E.V., Kolsanov A.V., Bushkova .Y.V., Ivanova G.E.* Stroke affected lower limbs rehabilitation combining virtual reality with tactile feedback // Front. Robot. AI., 2020. Vol. 7. № 81.