

УДК 57:5176:616.8-009.1-085.851.8:004.946

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ УВЕЛИЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕАБИЛИТАЦИИ ПРИ ПОМОЩИ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННОГО ПОДБОРА РЕАБИЛИТАЦИИ
С ПОМОЩЬЮ АДАПТИРОВАННОЙ ВИРТУАЛЬНОЙ СРЕДЫ**

Захаров А.В., Чаплыгин С.С., Колсанов А.В.

ФГБОУ ВО «Самарский государственный медицинский университет»
Министерства здравоохранения Российской Федерации, Самара

Резюме. В работе проведен анализ возможности использования мультисенсорной виртуальной реальности для увеличения эффективности реабилитационных мероприятий, основанных на идеомоторном представлении сложных билатеральных движений конечностей. Построены математические модели в виде статистических коннектов межкортикальных взаимодействий, претерпевающих изменения на фоне активации периферического сенсомоторного аппарата. Продемонстрировано повышение активности в двигательных зонах коры головного мозга при активации проприоцептивной системы, что свидетельствует о повышении эффективности идеомоторного представления движений. Полученные результаты могут быть использованы в качестве способа повышения устойчивости и точности классификаторов нейрокомпьютерных интерфейсов, основанных на детекции сложных билатеральных движений.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование проводилось без спонсорской поддержки.

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

Для цитирования: Захаров А.В., Чаплыгин С.С., Колсанов А.В. Математическая модель оценки увеличения эффективности реабилитации при помощи технологии персонализированного подбора реабилитации с помощью адаптированной виртуальной среды // Вестник медицинского института «Реавиз». – 2020. – № 4. – С. 125–133.

MATHEMATICAL MODEL OF EVALUATION OF REHABILITATION EFFICIENCY INCREASE BY MEANS OF PERSONALIZED SELECTION TECHNOLOGY OF REHABILITATION THROUGH A CUSTOMIZED VIRTUAL ENVIRONMENT

Zakharov A.V., Chaplygin S.S., Kolsanov A.V.

Federal State Budgetary Institution of Higher Education «Samara State Medical University»
Ministry of Health of the Russian Federation, Samara

Abstract. The paper analyzes the possibility of using multi-sensory virtual reality to increase the effectiveness of rehabilitation measures based on the ideomotor representation of complex bilateral limb movements. Mathematical models were constructed in the form of statistical connectors of intercortical interactions undergoing changes against the background of peripheral sensomotor apparatus activation. The increased activity in the motor cortical zones of the proprioceptive system activation was demonstrated, which testifies to

the increased efficiency of the ideomotor representation of movements. The obtained results can be used as a way to improve the stability and accuracy of neurocomputer interface classifiers based on the detection of complex bilateral movements.



Conflict of interest. The authors declare that there is no conflict of interest.

Financing. The research was conducted without sponsorship.

Key words: motor rehabilitation, virtual reality, mathematical model.

To cite: Zakharov A.V., Chaplygin S.S., Kolsanov A.V. Mathematical model of evaluation of rehabilitation efficiency increase with the help of personalized rehabilitation selection technology with the help of adapted virtual environment // Newsletter of medical institute "Reaviz". – 2020. – № 4. – P. 125–133.

Введение

Проблема двигательной реабилитации пациентов при заболеваниях, сопровождающихся поражением центрального нейрона, является одной из значимой и нерешённой в современной медицине. Высокая распространенность и выраженность двигательных нарушений после острого нарушения мозгового кровообращения является одной из основных причин стойкой инвалидизации и высокой нагрузки на систему здравоохранения, связанной с обеспечением ухода за данными пациентами и обеспечения их в последующем индивидуальными средствами двигательной реабилитации.

Использование иммерсивной среды, в качестве которой может выступать виртуальная реальность (VR), позволяет моделировать различные реабилитационные мероприятия, востребованные на разных стадиях реабилитации, как в ранней реабилитации первого этапа, проводимого в условиях неврологического стационара в остром периоде нарушения мозгового кровообращения, так и на этапах, проводимых в условиях учреждений санаторного типа в раннем и позднем реабилитационных периодах [7]. Использование возможностей иммерсии в условиях VR позволяет увеличить длительность эффективного периода реабилитации [6]. В настоящее время данный период ограничен в среднем двумя годами, наибольший реабили-

тационный эффект наблюдается в первые полгода [10].

Возникающее после двух лет от момента возникновения заболевания так называемое «реабилитационное плато» является основной причиной прекращения реабилитационного прогресса, несмотря на высокую интенсивность реабилитационных воздействий. Причиной этому является снижение активации процессов нейропластичности, которые состоят из нескольких параллельно или последовательно протекающих процессов. Их активация и поддержание на высоком уровне активности, является основной задачей реабилитационных мероприятий на протяжении всех периодов [8]. В качестве основных процессов нейропластичности на данный момент рассматриваются: обучение Хебба, изменение баланса между активизирующими и тормозящими нейромедиаторами, снижение активности ГАМК-ергических нейронов, активация связей между отдельными участками коры головного мозга, неактивных ранее [2].

Использование физических методов реабилитации для активации этих механизмов нейропластичности подразумевает использование достаточно сложных, технически, устройств (роботизированных комплексов) [9]. Имеются ограничения по доступности данных способов реабилитации для пациентов, вследствие ограниченных сроков госпитализации, не доста-

точная эффективность амбулаторной реабилитации, по причине удаленности проживания пациента относительно нахождения специализированных реабилитационных центров, а также множество других факторов, сочетание которых в конечном итоге приводят к снижению первоначально достигнутого прогресса и стойкой фиксации двигательных или других нарушений.

ВР, выступающая в качестве интерфейса между различными техническими устройствами, может пользоваться в качестве активации всех известных на данный момент процессов нейропластичности, доказательством чему являются изменения, регистрируемые в работе центральной нервной системы, на основе таких методов, как: электроэнцефалография (ЭЭГ), магнитная энцефалография, функциональная магнитно-резонансная томография [1, 3].

Увеличение эффективности по активации нейропластичности в ВР может быть достигнуто при использовании сенсорного воздействия за счет активации проприоцептивной системы. Помимо насыщенного использования визуального ряда, в ВР можно получить дополнительные и очень важные сенсорные ощущения, связанные с взаимодействием с виртуальными объектами за счет активации проприоцептивной системы. Это увеличивает эффекты когнитивного, сенсорного и эмоционального погружения в ВР [4]. Таким образом, использование мультисенсорного взаимодействия с виртуальным объектом может являться одним из способов увеличения эффективности реабилитационного процесса [5].

Цель: получение математической модели, демонстрирующей повышение эффективности идеомоторного представления билатерального движения конечностей в иммерсивной среде за счет активации периферического сенсомоторного аппарата.

Материалы и методы

В исследовании приняли участие 31 здоровый доброволец в возрасте от 18 до 20 лет (средний возраст 18,2 года). Монопольная регистрация ЭЭГ проводилась с помощью усилителя BrainAmp («Brain Products», Germany, EC) в 128 отведениях (по электродной системе International 10–10) с электродом сравнения, установленным на Cz. Сопротивление контактов при ЭЭГ электродов не превышало 10 кОм. При оцифровке ЭЭГ частота дискретизации сигнала составляла 500 Гц. После оцифровки производилась фильтрация ЭЭГ в диапазоне частот 0,01–60 Гц с использованием Notch-фильтра 50 Гц.

При регистрации испытуемый сидел в кресле с надетыми очками ВР Oculus Rift S («Oculus», USA) (частота обновления экрана 80 Гц, разрешение экрана 2560×1440). Изучение динамики изменений биоэлектрической активности коры головного мозга (с помощью регистрации скальповых энцефалографических сигналов) проводилось на фоне демонстрации визуального ряда (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), а также кинестетического представления данных движений. Визуальное наблюдение и кинестетическое представление данных движений проводилось в моделируемой (виртуальной) реальности. В последующем проводилась регистрация визуального наблюдения и кинестетического представления движений верхних и нижних конечностей после активации периферических сенсомоторных структур с помощью вибрационного воздействия.

В качестве первой экспериментальной сессии здоровые добровольцы наблюдали в течение 5 секунд за видеорядом, демонстрирующим в первом эксперименте би-

мануальные движения, во втором эксперименте билатеральные движения нижних конечностей. Общее количество данных наблюдений составило 30 повторов, чередующихся с эпизодами демонстрации статичной картинке верхних или нижних конечностей. Общая длительность экспериментальной сессии составила 5 минут для одного вида движений.

Экспериментальная сессия при идеомоторном представлении бимануальных или билатеральных движений нижних конечностей проводилась в различные дни, без перерыва или с перерывом в 1–2 дня. Идеомоторное представление до и после активации периферического сенсомоторного аппарата проводилась в течение одного дня в виде двух отдельных сессий, сначала при кинестетическом представлении бимануальных движений, затем билатеральных движений нижних конечностей.

Вибрационное воздействие оказывалось с помощью платформы Power Plate («Performance Health Systems, LLC», USA) в виде воздействия при стоянии испытуемого на платформе в течение 5 минут с целью оказания воздействия на сенсомоторный аппарат нижних конечностей или при нахождении в положении «упор лежа» при воздействии на периферический сенсомоторный аппарат верхних конечностей. Длительность воздействия составляла 3–5 минут с частотой вибрации 50 Гц.

Авторы заявляют, что у них нет явного или потенциального конфликта интересов, связанного с публикацией этой статьи. Эксперименты проводились в соответствии с изложением этических принципов биомедицинских исследований Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующими обновлениями и были одобрены местным комитетом по биоэтике ФГБОУ ВО СамГМУ. Перед участием в исследовании испытуемые подписали письменное информированное согласие, одобренное комитетом по биоэтике.

Результаты получены 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 17.03.2020 г., идентификатор соглашения о предоставлении субсидии – 0000000007119P190002).

Результаты

На этапе проведения первой экспериментальной сессии проводилось сравнение кинестетического и визуального представления верхних и нижних конечностей без активации периферического сенсомоторного аппарата. Данная сессия была организована для того, чтобы продемонстрировать эффективность использования кластерного анализа в качестве метода, позволяющего дифференцировать сложные движения верхних и нижних конечностей. А именно, бимануальные движения, необходимые для взаимодействия с внешними объектами и объектами ВР, а также билатеральные движения нижних конечностей, необходимых для передвижения. Выявление данных различий на основе кластерного анализа необходимо для успешной работы классификаторов, лежащих в основе нейрокомпьютерного интерфейса, основанного на детекции сложных бимануальных, билатеральных движений.

При кластерном анализе получены статистически достоверные различия при сравнении ЭЭГ изменений при визуальном наблюдении и кинестетическом представлении движений как для верхних, так и для нижних конечностей (график 1). Полученные в результате кластерного анализа различия заключались в появлении процессов десинхронизации, регистрируемых в затылочной и лобно-теменной областях.

После второй экспериментальной сессии проведен ANOVA анализ сравнения четырех состояний: кинестетическое представление бимануального движения и билатерального движения нижних конечностей до и после активации периферического сенсомоторного аппарата. Результаты кластерного анализа сравнения данных состояний представлены на графике 2.

Согласно полученным данным, можно сделать заключение, что дифференцировка верхней и нижней конечности до активации периферического сенсомоторного аппарата было недостоверной, и значение статистического различия в кластере составляло $p = 0,06$. После активации периферического сенсомоторного аппарата

дифференцировка в кластере значительно увеличилась до $p = 0,04$, так как помимо процессов десинхронизации в соответствии с предыдущими данными наблюдались дополнительно процессы синхронизации сенсомоторного ритма, что значительно увеличило эффективность кластерного анализа в получении различий между этими двумя состояниями вне зависимости от локализации ЭЭГ отведений, демонстрирующих статически достоверные различия. На фоне воздействия активации периферического сенсомоторного аппарата наблюдается уменьшение отклонения от среднего значения мощности (реакция десинхронизации) в частотном диапазоне от 35 до 50 Гц.

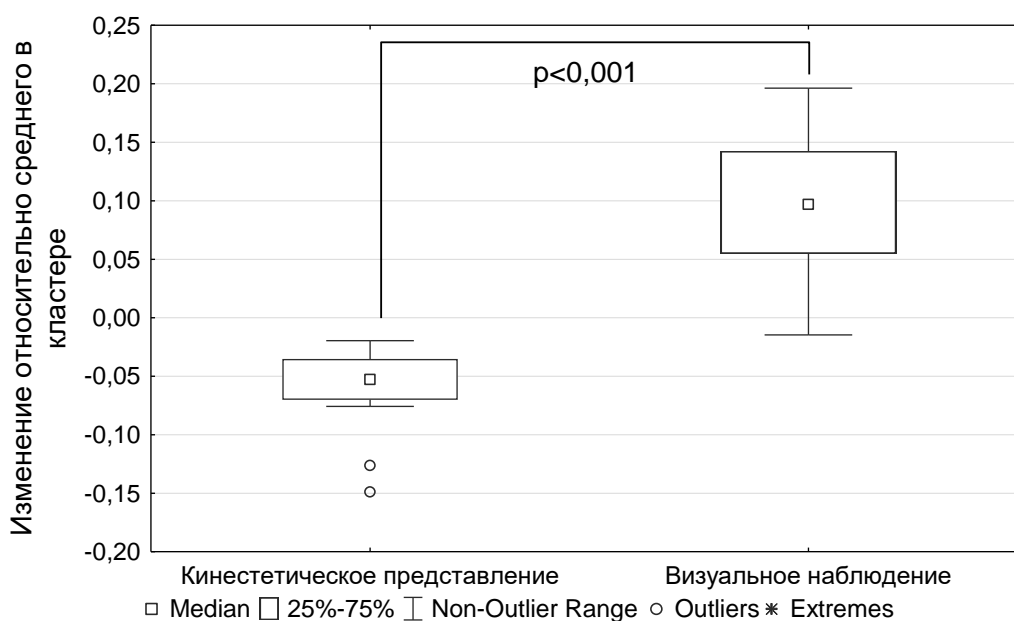


График 1. Результаты кластерного анализа ЭЭГ изменений, демонстрирующих значимые различия при кинестетическом представлении бимануального движения.

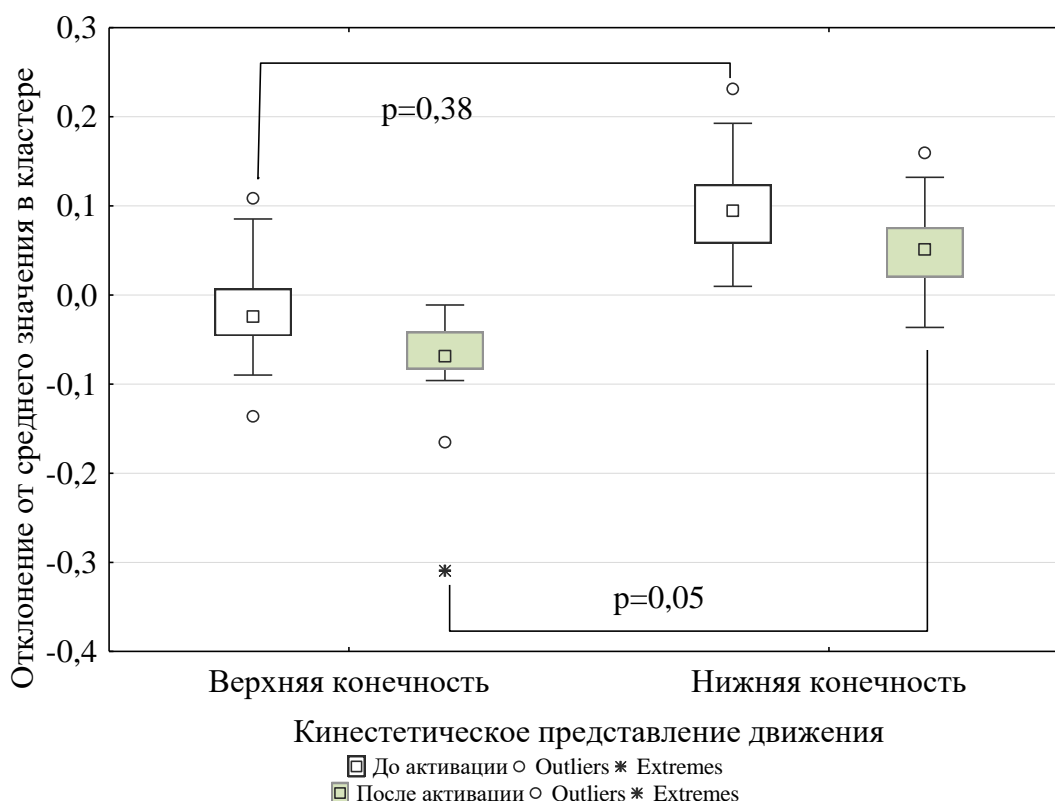


График 2. Результаты кластерного анализа ЭЭГ изменений, демонстрирующих значимые различия при кинестетическом представлении бимануальных движений верхних конечностей и ходьбы до и после активации периферического сенсомоторного аппарата

Построение математических моделей, соответствующих изменениям в виде формирования новых связей между отдельными корковыми представительствами на основании когерентного анализа при воздействии на периферический сенсомоторный аппарат проводилось в два этапа.

На первом этапе преобразование данных ЭЭГ после notch-фильтрации, удаления окулографического артефакта методом независимых компонент производилось с помощью вейвлет преобразования.

Комплексный вейвлет Морле:

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

Комплексный вейвлет МНАТ:

$$\begin{aligned} \psi_{\text{real}}(t) &= (1 - (\pi t f_0)^2) e^{-\frac{i}{2}(2\pi t f_0)^2} = \\ &= (1 - \tau^2) e^{-\frac{i}{2}\tau^2}. \end{aligned} \quad [2]$$

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

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

В результате данного анализа и последующей визуализации получены следующие данные относительно возможностей использования данного преобразования для последующего когерентного анализа с целью обнаружения изменений в виде повышения степени взаимодействия между отдельными областями коры головного мозга и повышения активности в сенсомоторной области. Обнаружение изменений, в которой является целью эффективности построенных математических моделей, демонстрирующих активацию процессов нейропластичности.

На рис. 1 и 2 приведено различие, полученное при кластерном анализе вейвлет преобразований до и после активации периферического сенсомоторного аппарата. Как видно, после его активации происходит ускорение возникновения различий в сравниваемых кластерах уже через 0,5 с после начала идеомоторного представления движений. Данные различия наблюдались как для идеомоторного представления верхних, так и нижних конечностей. При этом отмечается десинхронизация с увеличением мощности спектра в частотном диапазоне выше 35 Гц.

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 плот-

ность между двумя сигналами, а S_{xx} и S_{yy} – автоспектральные плотности для сигналов x и y . Когерентность определяется согласно формуле:

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

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 $\text{Coh}_{xy}(f) = \text{Coh}_{yx}(f)$.

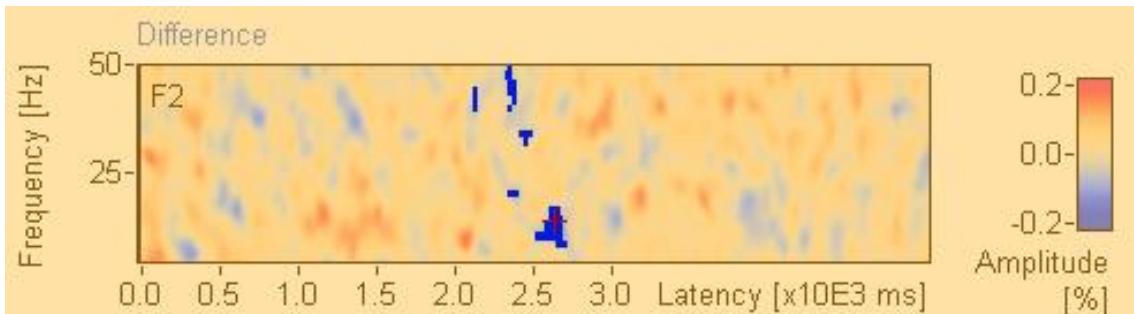


Рис. 1. Частотно-временной анализ различий кинестетического представления движения верхней и нижней конечности без активации периферического сенсомоторного аппарата

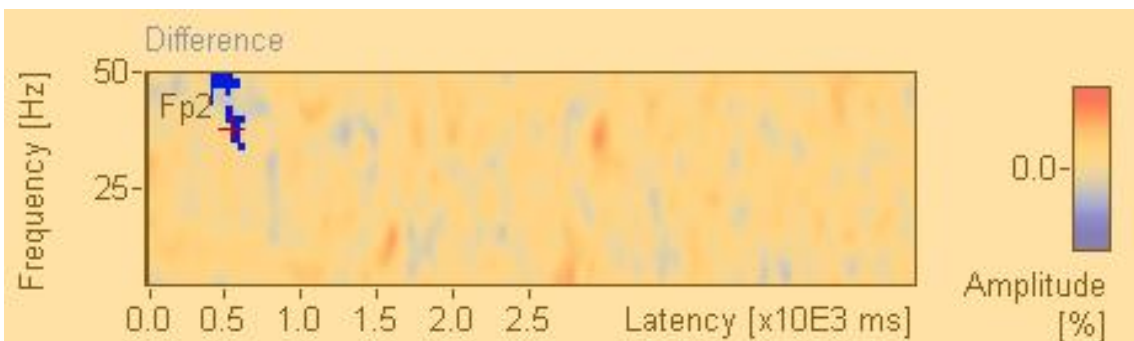


Рис. 2. Частотно-временной анализ различий кинестетического представления движения верхней и нижней конечности после активации периферического сенсомоторного аппарата

Согласно проведенному когерентному анализу до активации периферического сенсомоторного аппарата происходит выделение связей между затылочными и височными отведениями ЭЭГ, что может свидетельствовать об активации вентрального зрительного тракта активизирующегося в процессе наблюдения за анимированными конечностями в процессе выполнения задачи эксперимента. После активации периферического сенсомоторного аппарата отмечается увеличение корреляции между отведениями, локализованными в сенсомоторной области, активация которых является значимой при решении задач реабилитации относительно восстановления двигательной функции. При построении статистического коннектома, описывающего корреляции между активностью под отдельными отведениями для идеомоторного представления бимануального движения, характерна более локальная активация сенсомоторной области, что наблюдается на рис. 3.

При этом, практически полностью, перестают быть активными участки коры головного мозга затылочной локализации (согласно регистрируемой активности скальповыми ЭЭГ электродами). Образование данного «фокуса» может рассматриваться в качестве улучшения идеомоторного представления бимануального движения после активации периферического сенсомоторного аппарата.

Для когерентного анализа после активации периферического сенсомоторного аппарата при идеомоторном представлении билатерального движения нижних конечностей также характерно увеличение локализации активации в сенсомоторной области, при сохранной активности в теменно-затылочных областях. Данное наблюдение также укладывается в концепцию локализации центров ответственных за пространственный контроль окружающего пространства затылочно-теменной области, необходимых при таком движении, как ходьба.

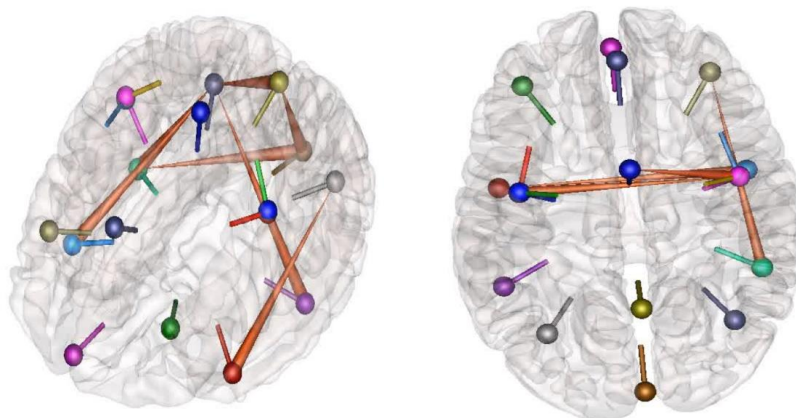


Рис. 3. Когерентный анализ взаимодействия затылочно-теменных взаимодействий до и после активации периферического сенсомоторного аппарата при идеомоторном представлении бимануальных флексорных/экстензорных движений в локтевом суставе. Слева до активации периферического сенсомоторного аппарата, справа – после активации

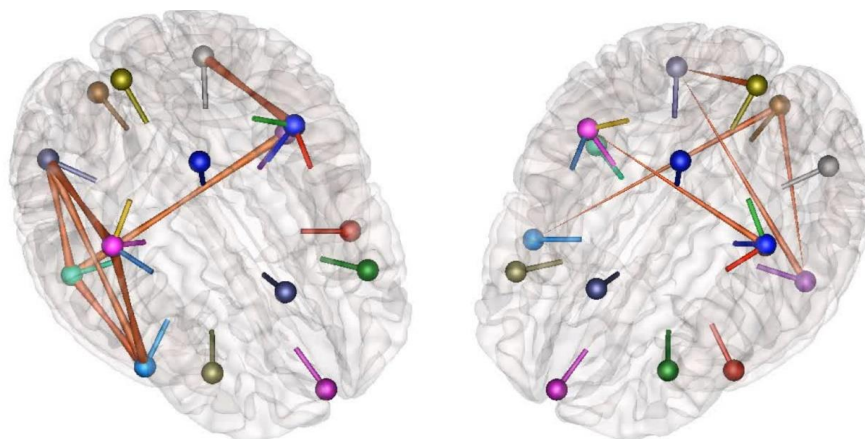


Рис. 4. Когерентный анализ взаимодействия затылочно-теменных взаимодействий до и после активации периферического сенсомоторного аппарата при идеомоторном представлении билатерального движения «ходьбы». Слева до активации периферического сенсомоторного аппарата, справа – после активации

Выводы

Таким образом, вибрационное воздействие, активирующее периферический сенсомоторный аппарат, можно использовать в качестве способа повышения дифференцировки идеомоторного представления верхней и нижней конечности у испытуемых на основании глобальной энцефалографии. Предложенные математические модели, основанные на когерентном анализе, демонстрируют появление различий в корреляции между ЭЭГ активно-

стью под отдельными электродами в высокоплотной (128 каналов) локализации при выполнении сложных движений. Использование периферической сенсомоторной активации значительно увеличивает возможности здоровых испытуемых по удержанию кинестетического образа сложных движений, что может выступать в качестве метода повышения чувствительности и специфичности классификатора интерфейса мозг-компьютер.

Литература / References

- 1 Pyatin V.F. i dr. Izmeneniya patternov sensomotornyh ritmov EEG pri dviga-tel'nom voobrazhenii // Nauka i innovacii v medicine. – 2016. – Т. 1. – № 1. – S. 46–51.
- 2 Alia C. 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.
- 3 Borra E., Luppino, G. Functional anatomy of the macaque temporo-parieto-frontal connectivity // Cortex. – 2017. – № 97. – P. 306–326.
- 4 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.
- 5 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.
- 6 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.

- 7 Laver K. E. et al. Virtual reality for stroke rehabilitation // *Cochrane Database of Systematic Reviews*. – 2017. – Vol. 217.
- 8 Maier M. et al. Effect of Specific Over Nonspecific VR-Based Rehabilitation on Poststroke Motor Recovery: A Systematic Meta-analysis // *Neurorehabilitation and Neural Repair*. – 2019. – № 33. – P. 112–129.
- 9 Winstein C. J. et al. Guidelines for Adult Stroke Rehabilitation and Recovery // *Stroke*. – 2016. – Vol. 47.
- 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.

Авторская справка

**Захаров Александр
Владимирович**

Кандидат медицинских наук, доцент кафедры неврологии и нейрохирургии, ФГБОУ ВО «Самарский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Самара, Россия

**Чаплыгин Сергей
Сергеевич**

кандидат медицинских наук, доцент, директор Института инновационного развития, ФГБОУ ВО «Самарский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Самара, Россия

**Колсанов Александр
Владимирович**

доктор медицинских наук, профессор РАН, профессор, ректор, заведующий кафедрой оперативной хирургии и клинической анатомии с курсом инновационных технологий, ФГБОУ ВО «Самарский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Самара, Россия

Статья поступила 06.07.2020
Одобрена после рецензирования 20.07.2020
Принята в печать 04.08.2020

Received July, 6th 2020
Approved after reviewing July, 20th 2020
Accepted for publication August, 4th 2020