

УДК 612.821+57.087.1

АНАЛИЗ ВЫПОЛНЕНИЯ СИНХРОННЫХ ДВИЖЕНИЙ В ПАРЕ «ЭКСПЕРИМЕНТАТОР – ИСПЫТУЕМЫЙ»

*Куличенко А. М., Махин С. А., Аликина М. А., Кайда А. И., Черненко Е. В.,
Павленко В. Б., Куличенко Е. А.*

*Таврическая академия (структурное подразделение) ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского», Симферополь, Республика Крым, Россия
E-mail: alexander.kulichenko@gmail.com*

В статье представлены результаты разработки и апробации методики регистрации и оценки одновременных вращательных движений мышью в паре «экспериментатор – испытуемый». Методика предназначена для исследования механизмов работы зеркальной системы мозга в следующих экспериментальных ситуациях: самостоятельные движения испытуемым компьютерной мышью по кругу в произвольном ритме; имитация движений, выполняемых экспериментатором; движения по кругу в произвольном ритме при наблюдении за аналогичными движениями, выполняемыми экспериментатором. Использование апробированного показателя синхронности позволяет оценивать степень навязывания ритма движений экспериментатора на деятельность испытуемого. Предполагается использование методики для диагностики степени развития зеркальной системы мозга, в том числе у детей с расстройствами аутистического спектра.

Ключевые слова: движения, синхронность, зеркальная система мозга.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в когнитивной нейронауке все большее внимание уделяется исследованиям процессов, напрямую не связанных с внешними сенсорными раздражителями, а обеспечивающих социальное взаимодействие: обучение путем подражания, имплицитное понимание действий окружающих и эмпатию [1]. Важным моментом для такого рода работ стало открытие группы итальянских исследователей, возглавляемых Д. Ризолатти. Ими были обнаружены нейроны, которые активировались как при выполнении животным какого-либо действия, так и когда животное наблюдало то же самое действие, выполняемое другим животным [2, 3]. Подобные реакции отмечаются у человека, который наблюдает за действиями другого индивида [4, 5]. Наблюдатель в своем воображении выполняет движение по воспринимаемому образцу, т. е. внутри себя отражает наблюдаемое действие. Представление о существовании такого внутреннего отражения привело к возникновению термина «зеркальная система мозга» (ЗСМ) [5]. Предполагается, что активность ЗСМ является нейробиологическим субстратом взаимодействия между людьми. С активацией ЗСМ связан феномен подавления одного из компонентов электроэнцефалограммы, называемого сенсомоторным, или мю-ритмом. Данный ритм имеет свойство супрессироваться, когда человек совершает произвольное

движение. Однако подавление этого компонента электроэнцефалограммы происходит и в том случае, когда испытуемый наблюдает, как то же самое действие совершает другой человек. Рамачандран и Оберман предположили, что реакцию подавления мю-волн можно использовать в качестве простого, надежного и безопасного инструмента для изучения активности зеркальных нейронов [6]. Это предположение было проверено на типично развивающихся детях и детях с аутизмом. У здоровых детей мю-ритм во время наблюдения за произвольным движением другого человека супрессировался. У детей с аутизмом подавления мю-ритма не наблюдалось. Данное открытие инициировало исследования ЗСМ во многих лабораториях мира.

Одним из важных аспектов изучения механизмов работы зеркальных нейронов является выбор поведенческой ситуации, адекватной задачам эксперимента. В большинстве случаев для исследования ЗСМ используются относительно простые привычные движения, при которых наблюдается «захватывание» ритма движений испытуемым. В качестве подобных ситуаций используются разгибания и сгибания пальца руки, маятникообразные движения ногой и т. п., при которых наблюдается эффект «захватывания» ритма движений другого человека. Совместные действия предполагают пространственно-временное согласование и требуют интеграции собственного поведения с действиями другого [7, 8].

В рамках данного направления исследований в нашей лаборатории изучаются частотно-амплитудные характеристики μ -ритма ЭЭГ у испытуемых при реализации ряда экспериментальных ситуаций, используемых как тест на активацию ЗСМ, включая следующие: самостоятельные ритмичные движения компьютерной мышью по кругу; наблюдение за аналогичными движениями, выполняемыми экспериментатором; имитация движений, выполняемых экспериментатором [9, 10]. В одной из используемых экспериментальных ситуаций испытуемому предлагается выполнять самостоятельные круговые движения мышью в собственном ритме, но в условиях наблюдения за движениями другим человеком. При этом также наблюдался эффект «захватывания» ритма. Однако степень синхронности движений обоих участников эксперимента оценивалась субъективно.

Принимая во внимание актуальность вышеизложенной проблемы, целью нашего исследования является разработка и апробация методики одновременной регистрации и оценки синхронности движений двух участников эксперимента по изучению механизмов работы ЗСМ человека. В данной статье приводится детальное описание методики эксперимента как по изучению механизмов межличностной координации действий в режиме реального времени, так и работы ЗСМ человека. Предложен ряд показателей синхронности круговых вращений компьютерным манипулятором – мышью. Даются также методические рекомендации по использованию предложенного метода при исследовании ЗСМ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Применимость методики оценки синхронизации движений экспериментатора и испытуемого исследовалась в следующих экспериментальных ситуациях: 1) самостоятельные движения мышью по кругу в произвольном ритме; 2) имитация

движений, выполняемых экспериментатором; 2) движения мышью по кругу в произвольном ритме при наблюдении за аналогичными движениями, выполняемыми экспериментатором.

Одновременная регистрация круговых движений компьютерными мышами проводилась с помощью специально разработанной компьютерной программы (программист Куличенко Е. А.). По окончании эксперимента данные о движении обоих манипуляторов записываются и могут быть в дальнейшем использованы этой программой для проведения анализа и сравнения с другими экспериментами. Мониторы у участников эксперимента (экспериментатора и испытуемого) отдельные и подключены в режиме расширения рабочего стола.

На рис. 1 изображена экспериментальная ситуация в режиме отработки данной методики.

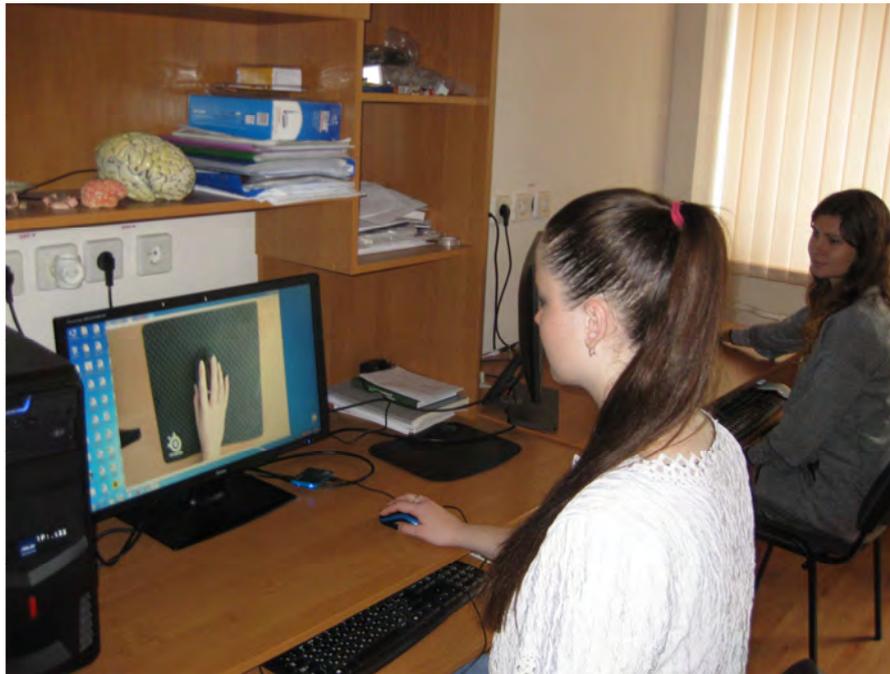


Рис. 1. Пример одновременной регистрации вращательных движений испытуемого и экспериментатора в режиме отработки методики. Испытуемый (на переднем плане) двигает мышью по кругу в произвольном ритме при наблюдении за движениями, выполняемыми экспериментатором в его собственном ритме (на заднем плане).

Настоящее исследование соответствовало этическим принципам Хельсинкской декларации 1964 г. и было одобрено этическим комитетом Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Одновременная регистрация круговых движений компьютерными мышами проводилась с помощью специально разработанной компьютерной программы.

На основе дискретных значений координат компьютерных манипуляторов и времени их получения программа рассчитывает ряд показателей, которые затем выводит в виде статистических значений и графиков. В зависимости от этапа эксперимента влияние, оказываемое движениями экспериментатора на движения испытуемого, может быть оценено соответствующими из этих значений.

В первой серии эксперимента испытуемым предлагалось выполнять самостоятельные движения мышью по кругу в произвольном ритме без участия экспериментатора. Такие записи проводятся с целью оценки особенностей выполнения зрительно контролируемых действий, включая предпочтение направления движения мышью, скорость, амплитуду и частоту движений. Данные записи необходимы также для сравнительного анализа с данными последующих серий. На рис. 2 представлен график распределения частоты вращательных движений мышью одного из испытуемых, выполняемых в произвольном ритме.

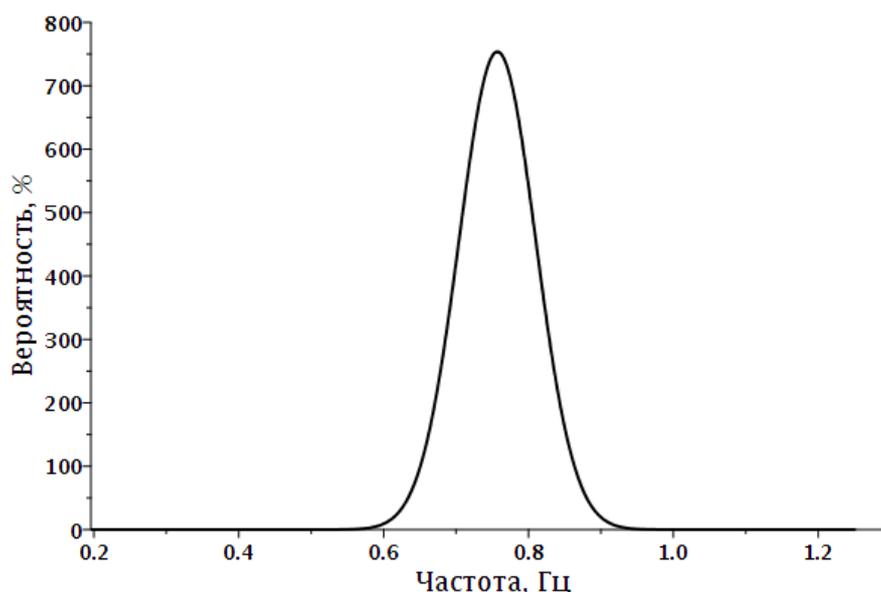


Рис. 2. Вероятностный график распределения частоты произвольных вращательных движений компьютерной мышью испытуемого. Усреднены данные пяти экспериментальных серий. По оси абсцисс – частота произвольных вращательных движений (Гц); по оси ординат – вероятность (%).

В случае, представленном на рис. 2, средняя частота (темп) вращений компьютерным манипулятором составляет 0,76 Гц (оборотов в секунду). Как видно из рис. 2 неравномерность скорости движений испытуемого характеризует размах распределения (отклонения от средней скорости вращения).

Во второй серии эксперимента испытуемому предлагалось имитировать движения, выполняемые экспериментатором. В этой серии экспериментатор выполнял вращательные движения мышью с переменной скоростью, периодически ускоряя или замедляя движения руки. Для оценки индивидуальных особенностей движений испытуемого не менее значимой является величина ускорения, которая так же, как отклонения от средней скорости вращения, характеризует неравномерность движений. На рис. 3 представлен вероятностный график усредненных значений среднего ускорения движений компьютерной мышью.

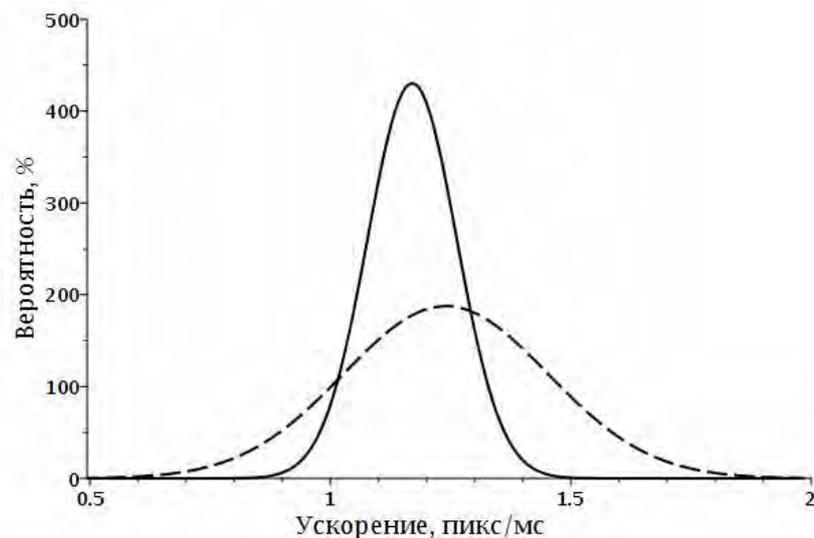


Рис. 3. Вероятностный график распределения ускорения движений компьютерных манипуляторов экспериментатора (сплошная линия) и испытуемого (пунктирная линия). По оси абсцисс – ускорение в пикс/мс; по оси ординат – вероятность (%).

В случае, представленном на рис. 3, среднее ускорение для экспериментатора составляет 1310 пикс/с, а для испытуемого – 1080 пикс/с.

Во время задачи вращения компьютерной мышью описываемые кривые являлись по форме овалами. Следует полагать, что высокой содержательной ценностью обладает предложенный нами для оценки особенностей движений показатель ширины траектории. Он вычисляется по величинам расстояний между вершинами описываемых овалов и оценивается в пикселях экрана компьютера. При увеличении ширины траектории снижается скорость движения и его темп. На рис. 4. представлен пример вероятностного графика распределения значений ширины траектории при самостоятельных движениях испытуемого и при совместных с экспериментатором. Экспериментатор, перемещая указатель мыши не по окружности, а из стороны в сторону оказал влияние, увеличив ширину траектории в среднем на 10 %. Как видно из графика, при самостоятельных движениях вариабельность показателей меньше, чем при совместных.

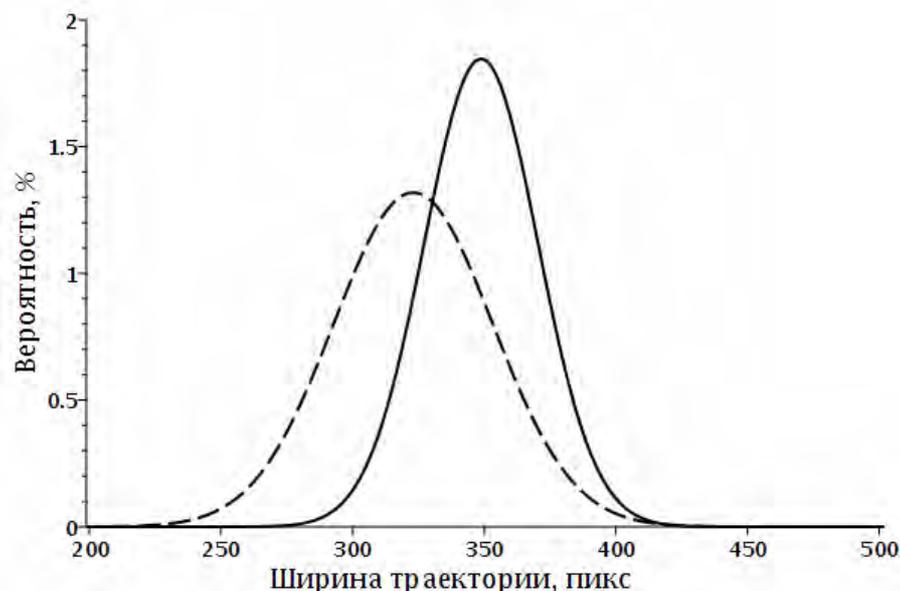


Рис. 4. Вероятностный график распределений ширины траектории овалов, описываемых при движениях испытуемого. Пунктирной и сплошной линиями обозначены самостоятельные и произвольные движения при воздействии экспериментатора соответственно. По оси абсцисс – ширины траектории (величина диаметра) (пикс); по оси ординат – вероятность (%).

В третьей серии эксперимента испытуемому предлагалось выполнять движения мышью по кругу в произвольном ритме при наблюдении за аналогичными движениями, выполняемыми экспериментатором. Именно данная серия позволяет экспериментатору оценить степень навязывания ритма испытуемому посредством собственных движений. Отдельно следует сказать, что оценка синхронности движений достаточно сложна в связи с вариабельностью данных, характеризующих движения испытуемых. Проанализировав большой массив исходных данных при выполнении самостоятельных движений и оценив вариабельность, обусловленную индивидуальными различиями, удалось прийти к наиболее оптимальному показателю синхронности – суммарному проценту фазовой синхронизации. Данный показатель является наиболее информативным в отношении определения наличия связи между сигналами. Он зарекомендовал себя во многих исследованиях высокой чувствительностью (Киселев и др., 2016) [11]. Суммарный процент фазовой синхронизации представляет собой долю времени эксперимента, когда сигналы были синхронны. Расчет данного показателя производился следующим образом:

- 1) для обоих сигналов рассчитывалась мгновенная фаза;
- 2) с помощью «скользящего окна» и метода наименьших квадратов находились участки фазовой синхронизации;
- 3) находилось отношение суммы временных интервалов этих участков к общей продолжительности эксперимента.

На рис. 5. представлен пример графика разности мгновенных фаз движений экспериментатора и испытуемого, выполненных одновременно.

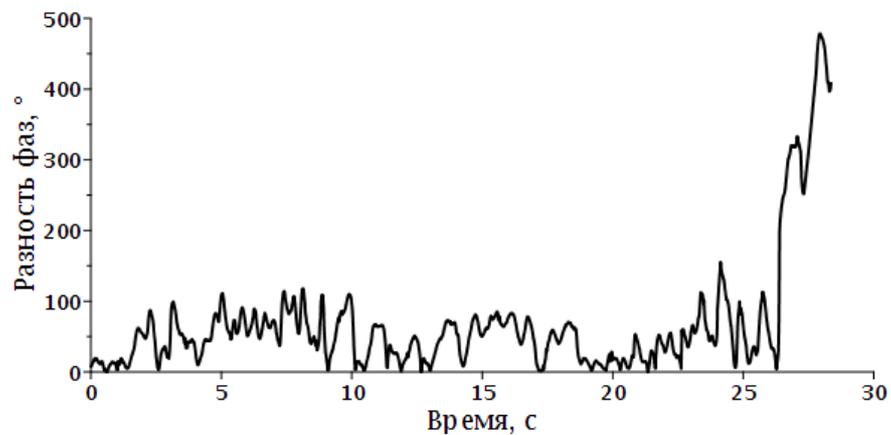


Рис. 5. График синхронности движений при выполнении испытуемым задачи имитации движений. По оси абсцисс – время (с); по оси ординат – разность фаз в угловых градусах.

Как видно из данного рисунка, испытуемому легко удавалось придерживаться ритма движений экспериментатора на протяжении 26 с. Но на 27-ой секунде наблюдается значительное увеличение разности фаз.

Показатель синхронности движений составил 69,8 %, что является достаточно высоким результатом.

На рис. 6 представлен график распределения частот вращательных движений испытуемого, выполняющего самостоятельные движения во время первой серии эксперимента (прерывистая линия) и при совместных движениях с экспериментатором в третьей серии (сплошная линия). Среднее значение этого показателя выросло с 0,76 Гц до 0,83 Гц, что свидетельствует об увеличении темпа движений испытуемым под влиянием экспериментатора, средняя частота вращений которого составляла 0,98 Гц.

На рис. 7 представлен результирующий график разности фаз при выполнении испытуемым задачи выполнения движений в произвольном ритме с одновременным наблюдением за движениями экспериментатора. Как видно из графика, степень синхронности движений у испытуемого с экспериментатором достаточно высока.

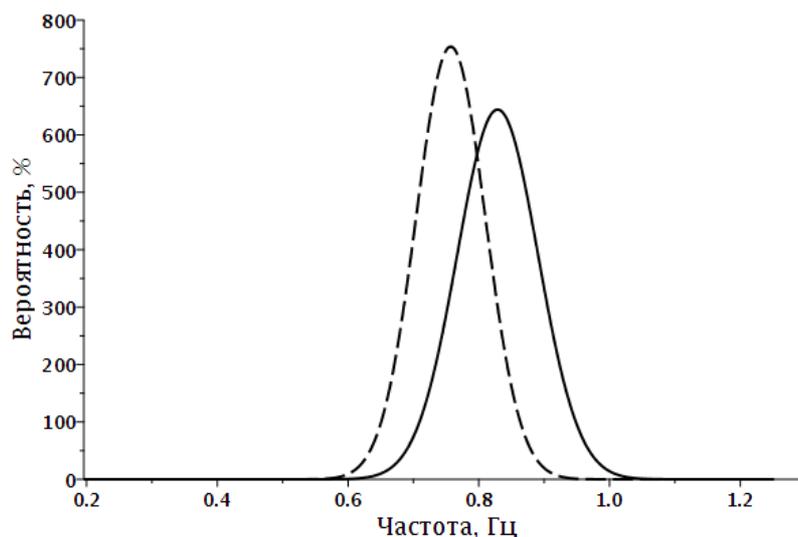


Рис. 6. График распределения частоты вращения испытуемого при самостоятельных движениях (пунктирная линия) и при совместных движениях с экспериментатором (сплошная линия). По оси абсцисс – частота вращательных движений (Гц); по оси ординат – вероятность (%).

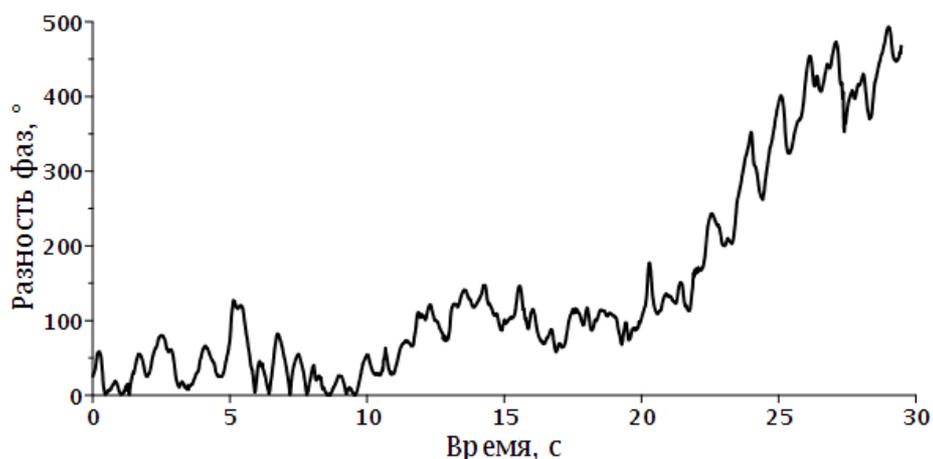


Рис. 7. График синхронности движений при выполнении испытуемым движений в собственном ритме с одновременным наблюдением за действиями экспериментатора. По оси абсцисс – время; по оси ординат – разность фаз в угловых градусах.

Ее числовой показатель составил 52,7 %. Сопоставляя записи движений этого испытуемого в описываемой экспериментальной ситуации с ситуацией самостоятельных движений в произвольном ритме без участия экспериментатора,

можно прийти к выводу об определенном влиянии зрительного восприятия движений экспериментатора на ритм движений этого испытуемого.

По нашему мнению, показатели одновременных записей координат курсоров компьютерных мышей позволяют объективно оценивать степень синхронности движений, выполняемых испытуемыми. Полученные данные важны для сопоставления с другими биологическими показателями, включая электроэнцефалографические корреляты совместной деятельности.

Предполагается, что апробированная в настоящем исследовании методика одновременной регистрации движений компьютерными манипуляторами позволит широко использовать ее для изучения закономерностей работы ЗСМ, в частности природы феномена «навязывания ритма». С учетом возможностей этой методики предполагается ее использование для диагностики и коррекции зрительно контролируемых действий у детей с расстройствами аутистического спектра.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Показатели одновременных записей курсоров компьютерных манипуляторов (мышей) позволяют объективно оценивать степень синхронности выполняемых движений в паре «экспериментатор – испытуемый», характеризующую феномен «навязывания ритма».
2. На основе оценки адекватного по количеству массива записей движений компьютерной мышью предложен алгоритм расчета суммарного процента фазовой синхронизации. Данный показатель позволяет в достаточной степени оценивать спонтанную синхронизацию движений пары «экспериментатор – испытуемый».
3. Спонтанная синхронизация движений испытуемого с движениями экспериментатора может быть оценена с помощью анализа совокупности величин предложенных показателей.

Работа выполнена на оборудовании ЦКП ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского» «Экспериментальная физиология и биофизика».

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках инициативной части государственного задания № 6.5452.2017/8.9 Минобрнауки России в сфере научной деятельности темы «Временная организация физиологических систем человека и животных: феноменология и механизмы генерации и регуляции микро- и мезоритмов».

БЛАГОДАРНОСТЬ. Авторы благодарят доцента кафедры дифференциальных уравнений и геометрии факультета математики и информатики, кандидата физико-математических наук В. А. Лукьяненко за плодотворное сотрудничество в деле освоения современных средств обнаружения синхронизации между колебательными системами и приятную совместную работу.

Список литературы

1. Соколов П. А. Активность системы зеркальных нейронов по данным фМРТ при просмотре и воображении видеосюжетов: диссертация ... кандидата биологических наук / Соколов П. А. – Москва, 2014. – 114 с.
2. Rizzolatti G. Premotor cortex and the recognition of motor actions. / Rizzolatti G., Fadiga L., Gallese V., Fogassi L. // *Brain Res. Cogn. Brain Res.* – 1996. – 3 (2). – P. 131–141.
3. Rizzolatti G. The organization of the cortical motor system: new concepts. / Rizzolatti G., Luppino G., Matelli M. // *EEG Clin Neurophysiol.* – 1998. – 106. – P. 283–296.
4. Rizzolatti G. Neurophysiological mechanisms underlying action understanding and imitation. / Rizzolatti G., Fogassi L., Gallese V. // *Nat Rev. Neurosci.* – 2001. – 2. – P. 661–670.
5. Di Pellegrino G. Understanding motor events: a neurophysiological study. / Di Pellegrino G., Fadiga L., Fogassi L., Gallese V., Rizzolatti G. // *Exp. Brain Res.* – 1992. – 91(1). – P. 176–180.
6. Рамачандран В. Разбитые зеркала: теория аутизма / Рамачандран В., Оберман Л. // *В мире науки.* – 2007. – 3. – С. 34–46.
7. Novembre G. Motor simulation and the coordination of self and other in real-time joint action. / Novembre G., Ticini L. F., Schütz-Bosbach S., Keller P. E. // *Soc. Cogn. Affect. Neurosci.* – 2014. – 9. – P. 1062–1068.
8. Keller P. E. Rhythm in joint action: psychological and neurophysiological mechanisms for real-time interpersonal coordination. / Keller P. E., Novembre G., Hove M. J. // *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences.* – 2014; 369(1658):20130394. doi:10.1098/rstb.2013.0394.
9. Махин С. А. Взаимосвязь между личностными эмпатийными характеристиками и реактивностью сенсомоторного ритма при наблюдении за биологическим движением / Махин С. А., Орехова Л. С., Макаричева А. А., Павленко В. Б. // *Ученые записки Таврического национального университета им. В. И. Вернадского. Серия «Биология, химия».* – 2013. – 26 (65). – 3. – С. 136–144.
10. Эйсмонт Е. В. Особенности μ -ритма ЭЭГ и его реактивности в задачах на выполнение, наблюдение, имитацию и слуховое восприятие движений у детей 4–14 лет / Эйсмонт Е. В., Махин С. А., Бакунова А. В., Кайда А. И., Павленко В. Б. // *Физиология человека.* – 2017. – 43 (3). – С. 43–50.
11. Киселев А. Р. Метод оценки степени синхронизации низкочастотных колебаний в вариальности ритма сердца и фотоплетизмограмме / Киселев А. Р., Караваев А. С., Гриднев В. И., Прохоров М. Д., Пономаренко В. И., Боровкова Е. И., Шварц В. А., Посненкова О. М., Безручко Б. П. // *Кардио-ИТ* – 2016. – 3 (1). – e0101.

ANALYSIS OF SIMPLIFICATION OF SYNCHRONOUS MOVEMENTS IN THE EXPERIMENTAL-EXPERIENCE COEL

Kulichenko A. M., Mahin S. A., Alikina M. A., Kayda A. I., Chernenko E. V., Pavlenko V. B., Kulichenko E. A.

*V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russian Federation
E-mail: alexander.kulichenko@gmail.com*

The article presents the results of development and approbation of the experimental technique designed to record simultaneous circular movements performed with the two computer mice in a pair of experimenter-test subjects to assess the degree of the motion synchronicity. This technique is meant to be implemented in the experimental studies of the brain mirror system mechanisms under the following conditions: self-paced circular movements with a computer mouse in an arbitrary rhythm; imitation of movements performed by the experimenter; circular motion in an arbitrary rhythm when observing similar

movements performed by the experimenter. The real-time recording of the mouse coordinates was performed with the help of the specifically designed computer program. It registered simultaneously the motion characteristics of the both mice while showing on the two monitors their movement dynamics and the real-time video of the experimenter's hand which moved the mouse. Based on the discrete values of mouse coordinates and the time, the program calculates a number of variables such as motion period, width of span, acceleration values. Following the analysis of the data collected with the help of the program and taking into account the variability related to individual differences, we have designed the algorithm for the total percentage of phase synchronicity. This indicator represents a fraction of the experiment time when the signals were synchronous. The program also processes the motion characteristics to provide their visual display in the form of statistical values and corresponding graphs.

The designed algorithm for simultaneous recording and processing the motion characteristics of the two computer mice allows for assessing objectively the degree of synchronicity of the performed movements in a pair of experimenter-test subjects to estimate in turn the phenomenon of "induced rhythms". Spontaneous synchronization of the test subject's movements with the movements performed by the experimenter can be assessed by means of the analysis of the variables recorded by the program.

The designed technique is intended to be implemented in studying the mechanisms of interindividual coordination of actions in real time, and assessing the level of development of the brain mirror system, including the children with the autism spectrum disorders.

Keywords: movement, synchronism, brain mirror system.

References

1. Sokolov P. A. Aktivnost' sistemy zerkal'nyh neyronov po dannym fMRT pri prosmotre i voobrazhenii videosyuzhetov : dissertatsiya ... kandidata biologicheskikh nauk. Moskva, (2014).
2. Rizzolatti G., Fadiga L., Gallese V., Fogassi L. Premotor cortex and the recognition of motor actions. *Brain Res. Cogn. Brain Res.*; **3**, 2 (1996).
3. Rizzolatti G., Luppino G., Matelli M. The organization of the cortical motor system: new concepts. *EEG Clin Neurophysiol.* 1998; 106 (1998).
4. Rizzolatti G., Fogassi L., Gallese V. Neurophysiological mechanisms underlying action understanding and imitation. *Nat Rev. Neurosci.* 2 (2001).
5. Di Pellegrino G., Fadiga L., Fogassi L., Gallese V., Rizzolatti G. Understanding motor events: a neurophysiological study. *Exp. Brain Res.* **91**, 1 (1992).
6. Рамачандран В., Оберман Л. Разбитые зеркала: теория аутизма *В мире науки* 3 (2007).
7. Novembre G., Ticini L. F., Schütz-Bosbach S., Keller P. E. Motor simulation and the coordination of self and other in real-time joint action. *Soc. Cogn. Affect. Neurosci.* 9 (2014).
8. Keller P. E., Novembre G., Hove M. J. Rhythm in joint action: psychological and neurophysiological mechanisms for real-time interpersonal coordination. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences.* 369(1658):20130394. doi:10.1098/rstb.2013.0394 (2014).
9. Makhin S. A., Orekhova L. S., Makarisheva A. A., Pavlenko V. B. Correlation between individual's empathy properties and sensorimotor rhythm reactivity to biological movement observation. *Scientific Notes of Taurida V. I. Vernadsky National University. – Series: Biology, chemistry.* **26**, 3 (2013).
10. Eismont E. V., Makhin S. A., Bakunova A. V., Kaida A. I., Pavlenko V. B. Properties of the EEG μ -rhythm and its reactivity during the performance, observation, imitation and auditory recognition of movements in children aged 4–14 years., *Human physiology*, **43**, 3 (2017).
11. Kiselev A. R., Karavaev A. S., Gridnev V. I., Prokhorov M. D., Ponomarenko V. I., Borovkova E. I., Shvartz V. A., Posnenkova O. M., Bezruchko B. P. *Method of assessment of synchronization between low-frequency oscillations in heart rate variability and photoplethysmogram.* *Cardio-IT* **3**, 1: e0101 (2016).