

УДК: 159.9.07
doi: 10.11621/vsp.2020.02.02

ЭЛЕКТРОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ВОСПРИЯТИЯ ИЛЛЮЗИИ ДВИЖЕНИЯ СОБСТВЕННОГО ТЕЛА В УСЛОВИЯХ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ

А. И. Ковалёв*, **А. О. Рогачев**, **О. А. Климова**, **А. Ф. Гасимов**

МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
Для контактов*. E-mail: artem.kovalev.msu@mail.ru

Актуальность. Изучение иллюзии движения собственного тела является важной задачей для современной психологии и нейронауки в связи с широким распространением систем виртуальной реальности. Особую значимость имеет исследование психофизиологических механизмов данного феномена, поскольку они представляют собой яркий пример межсенсорного взаимодействия.

Цели работы. Целью настоящей работы стало изучение психофизиологических механизмов иллюзии движения собственного тела в системе виртуальной реальности с применением электроэнцефалографии.

Методика и выборка. Испытуемыми стали 11 человек. Стимуляция представляла собой виртуальный опто-кинетический барабан, который совершал вращения по часовой стрелке и против вокруг вертикальной оси с угловыми скоростями 30, 45 и 60 угл. град/с длительностью 60 с каждое. Испытуемым было предъявлено 18 вращений: серия с инструкцией свободного осмотра зрительной сцены (3 скорости × 2 направления × 2 повторения), серия с инструкцией фиксировать взгляд по центру виртуальной сцены (3 скорости × 2 направления × 1 повторение). Также испытуемые после каждого вращения заполняли опросник «Симуляторное расстройство» и оценивали по 10-балльной шкале выраженность иллюзии. Стимуляция предъявлялась в шлеме виртуальной реальности HTC Vive. Регистрация электроэнцефалограммы во время наблюдения вращений цилиндра производилась с помощью устройства «Мицар-ЭЭГ-10/70-201».

Результаты. Были обнаружены значимые различия в выраженности иллюзии, общем балле опросника «Симуляторное расстройство» и мощности альфа-ритма в теменных отведениях в зависимости от скорости вращения. Чем выше скорость вращения, тем больше были значения данных зависимых переменных. Обнаружены большие значения мощности бета-

ритма в затылочных отведениях в сериях с фиксацией взора у испытуемых с высокими значениями выраженности иллюзии.

Выводы. Таким образом, показаны различия в биоэлектрической активности головного мозга во время переживания иллюзии движения собственного тела, связанные с механизмами зрительно-вестибулярной интеграции и повышения устойчивости внимания к выполнению моторной задачи удержания фиксации взгляда.

Ключевые слова: векция, виртуальная реальность, электроэнцефалограмма, движения глаз.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №17-36-01101 «Психофизиологические механизмы иллюзии движения собственного тела».

Для цитирования: Ковалёв А.И., Рогачев А.О., Климова О.А., Гасимов А.Ф. Электрофизиологические показатели восприятия иллюзии движения собственного тела в условиях виртуальной реальности // Вестник Московского университета. Серия 14. Психология. 2020. № 2. С. 26–44. doi: 10.11621/vsp.2020.02.02

Поступила в редакцию: 09.05.2020 / Принята к публикации: 27.05.2020

ELECTROPHYSIOLOGICAL INDICES OF THE VECTION ILLUSION IN VIRTUAL REALITY

*Artem I. Kovalev**, *Anton O. Rogachev*, *Oksana A. Klimova*,
Anton F. Gasimov

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

*Corresponding author. E-mail: artem.kovalev.msu@mail.ru

Relevance. The study of the self-motion (“vection”) illusion is an important task for modern psychology and neuroscience due to the widespread use of virtual reality systems. The study of psychophysiological mechanisms of this phenomenon has particular importance as an example of intersensory interactions.

Objective. To study the psychophysiological mechanisms of the self-motion illusion in a virtual reality system using electroencephalography.

Methodology. Eleven healthy subjects took part in the experiment. The stimulation was a virtual opto-kinetic drum that rotated clockwise and counterclockwise around a vertical axis with angular velocities of 30, 45 and 60 angular deg/s. The duration of each rotation was 60 seconds. The subjects were presented with 18 rotations; there was a series with instructions for free viewing of the visual scene (3 speeds × 2 directions × 2 repetitions) and a series with instructions to fix the gaze in the center of the virtual scene (3 speeds × 2 directions × 1 repetition). After each rotation, the subjects filled out the “Simulator Sickness Questionnaire” and evaluated the intensity of the illusion on a 10-point scale. Stimulation was presented in the HTC Vive virtual reality helmet. Electroencephalogram recording during the observation of cylinder rotations was performed using Mitsar-EEG-10/70-201.

Results. Significant differences were found in the intensity of the illusion, the total score on the questionnaire, and the power of the alpha rhythm in the parietal zones, depending on the speed of rotation. The higher the rotational speed, the greater the values of these dependent variables. Large values for beta-rhythm power in the occipital areas were found in the series with fixed eyes, in the subjects with high values for the intensity of the illusion.

Conclusions. Differences were shown in the bioelectrical activity of the brain during the experience of the self-motion illusion, related to mechanisms of visual-vestibular integration and greater attention to the performance of the motor task of gaze fixation.

Keywords: vection, virtual reality, electroencephalogram, eye movements.

Acknowledgments: This work was supported by RFBR grant No. 17-36-01101, “Psychophysiological mechanisms of the illusion of movement of one’s own body”.

For citation: Kovalev, A.I., Rogachev, A.O., Klimova, O.A., Gasimov, A.F. (2020). Electrophysiological indices of the vection illusion in virtual reality. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 14. Psikhologiya [Moscow University Psychology Bulletin]*, 2, P. 26–44. doi: 10.11621 / vsp.2020.02.02

Received: May 09, 2020 / Accepted: May 27, 2020

Введение. Изучение механизмов пространственного восприятия является одной из важнейших задач современной нейронауки. Несмотря на длительную историю изучения этой проблематики до сих пор отсутствуют общепризнанные модели, описывающие как нейрофизиологические компоненты пространственной функции, так и

ее когнитивную составляющую. Сложность исследования процессов восприятия пространства в широком смысле слова заключается во многом в том, что эти процессы рассматриваются изолированно с точки зрения изучения нескольких устоявшихся предметов научных изысканий.

Первым предметом является собственно восприятие пространства как, в первую очередь, познавательный процесс. В этом направлении рассматриваются вопросы зрительных признаков восприятия пространства (Loomis et al., 2008), проблема стабильности видимого мира (Барабанщиков и др., 2013), роль двигательной активности в пространственном восприятии.

Вторым предметом рассмотрения является изучение механизмов определения ориентации и положения тела в пространстве. В данном случае особый интерес исследователей представляют вопросы навигации и позиционирования. Благодаря исследованием М. Мозера и Дж. О'Кифа (Moser et al., 1998), удостоенным Нобелевской премии 2014 г., были получены новые данные о функционировании нейронов места в гиппокампе, что послужило развитию нейрофизиологических исследований в этой области. К проблемной области определения положения тела в пространстве стоит отнести и исследования формирования схемы тела, определения положения отдельных частей тела друг относительно друга.

Еще одной частью изучения пространственной функции является проблематика пространственных способностей как одной из составляющих интеллектуальной сферы. Различные тесты и методики, применяемые для изучения пространственных способностей, позволили установить связь этой переменной как со свойствами личности, характера и других показателей интеллекта (Tosto et al., 2014), так и с процессами ориентации в пространстве (Ventura et al., 2013).

Методологическая разобщенность описанных выше проблемных областей затрудняет изучение комплексных феноменов пространственного восприятия, примером которых является иллюзия движения собственного тела — возникновение у неподвижного человека переживания перемещения своего тела в пространстве при наблюдении движущегося стимула, занимающего значительную часть зрительного поля (Меньшикова и др., 2015). В англоязычной литературе эта иллюзия получила название «Векция» (от лат. Vectio — перенос). Показано, что одним из наиболее эффективных способов изучения векции является проведение экспериментов с применением установок виртуальной реальности, которые позволяют создать

условия наблюдения зрительной стимуляции большого размера (Keshavarz et al., 2014), что приводит к возникновению иллюзии высокой степени интенсивности.

Векция представляет собой удачный пример для изучения механизмов пространственной функции, поскольку связана и с определением положения и ориентации тела наблюдателя в пространстве, и с непосредственным наблюдением и детекцией движения окружающего пространства. Еще одним преимуществом выбора ИДСТ в качестве предмета исследования является тот факт, что механизмы данной иллюзии изначально рассматривались с когнитивно-нейронаучной точки зрения. Наиболее авторитетной теорией, объясняющей в общем виде причины возникновения векции, является теория сенсорного конфликта (Reason, 1975), которая изначально была разработана для объяснения возникновения кинетоза (двигательного расстройства, укачивания). Суть этой теории заключается в том, что информация от различных сенсорных систем интегрируется в мозге, и, при наличии рассогласования между поступающими сигналами, появляется ошибка в определении положения и ориентации тела в пространстве. Следствие такой ошибки становятся иллюзорное перемещение, тошнота и головокружение. Теория сенсорного конфликта получила в дальнейшем ряд уточнений и усовершенствований, главным из которых стало добавление влияния когнитивных высокоуровневых компонентов (знание человека о своем местоположении, прошлый опыт и т.п.) на работу интегратора (Keshavarz et al., 2014). Еще одним пунктом усложнения этой теории стало ее сближение с так называемой глазодвигательной гипотезой о возникновении векции. В соответствии с этой гипотезой иллюзия появляется в тот момент, когда наблюдатель не способен проследить движение зрительного стимула. В этом случае возрастает вес зрительного сигнала, несущего информацию о перемещении стимулов по сетчатке, что усиливает сенсорное рассогласование (Ebenholtz et al., 1994). Поэтому глазодвигательный компонент стал также одним из элементов общей структуры, определяющей положение и ориентацию тела человека в пространстве.

Несмотря на проведенные эксперименты по изучению векции, получить однозначные нейрофизиологические подтверждения теории сенсорного конфликта со всеми ее усовершенствованиями исследователям не удалось. Тем не менее с использованием различных методов были установлены некоторые общие элементы мозгового устройства иллюзии движения собственного тела. Так с

помощью техник нейровизуализации (функциональной магнитно-резонансной томографии и позитронно-эмиссионной томографии) удалось установить корковые и подкорковые области, связанные с восприятием векции (Kleinschmidt et al., 2002). Предполагается, что широкая нейронная область, вовлеченная в обработку информации о движущихся объектах, вносит свой вклад и в формирование иллюзии движения собственного тела. Это в первую очередь зоны зрительной коры (MST и MT+), задняя часть инсулярной коры (PINC), части верхней теменной коры, области интра-париетальной извилины (VIP, DIPSL). Эксперименты показали активацию этих зон во время возникновения иллюзии, однако томографические методы не позволили установить временную развертку мозговых механизмов, лежащих в основе появления иллюзии. Для этих целей предполагалось использовать методы электроэнцефалографии (ЭЭГ). Однако, стоит отметить, что было проведено небольшое количество экспериментов по изучению векции с помощью ЭЭГ, которые можно разделить на два типа. К первому относится, например, исследование группы ученых из Оксфорда под руководством К. Тило (Thilo et al., 2003), занимающихся проблемой интеграции сенсорной информации. В их исследовании испытуемый на широкоформатном дисплее наблюдал движущийся по кругу стимул, создающий иллюзию вращения самого испытуемого — круговую векцию. Промежутки возникновения иллюзии испытуемые отмечали с помощью манипулятора. Одновременно в центральной части поля зрения испытуемому предъявлялся сменяющийся шахматный паттерн. Оказалось, что во время переживания иллюзии амплитуда зрительного потенциала N70 на смену паттерна была существенно ниже, чем в отсутствие векции. Авторы пришли к выводу о том, что переживание иллюзии сопровождается снижением вклада зрительных областей коры.

Второй тип исследований предполагал предъявления стимулов, состоящих из центральной и периферической частей, движение в которых происходило либо в разные стороны, либо в одной из частей стимул оставался неподвижным во время движения стимуляции в другой части. Примером такого цикла работ являются исследования Берти и коллег (Berti et al., 2019), которые показали, что амплитуды теменного вызванного потенциала P200 и зрительного N200 на начало движения периферической части экрана меньше, чем в ответ на движение центральной части. И аналогичным образом были распределены интенсивности возникающей иллюзии. Эти эксперименты не позволяют сделать выводы о причинах и динамике

протекания векции, но позволяют установить связи между степенью активации зрительных зон и выраженностью иллюзии движения собственного тела.

Стоит отметить, что описанные выше эксперименты обладают некоторыми недостатками. Во-первых, стимуляция в этих исследованиях предъявлялась с помощью плоских экранов, диагональ которых не покрывала все зрительное поле испытуемых. Во-вторых, стимулы предъявлялись на время, не превышающее 45 с. Выбор таких условий, в первую очередь, был обусловлен необходимостью соблюдения требований эксперимента по регистрации ЭЭГ. Однако, как отмечалось некоторыми авторами, исследующими векцию, такие условия не являются оптимальными для провокации иллюзии (Palmisano et al., 2015).

Способом преодоления методических трудностей в изучении векции является использование систем виртуальной реальности. Как было показано в ряде исследований (Menshikova et al., 2014), устройства виртуальной реальности (VR) позволяют создавать условия для предъявления стимулов, занимающих значительную часть зрительного поля испытуемых. Тем не менее, эксперименты по изучению векции с применением VR и ЭЭГ проводились в крайне ограниченном количестве. Поэтому целью настоящей работы стало изучение изменений в активности теменных и затылочных отделов головного мозга во время переживания иллюзии движения собственного тела с использованием VR и регистрации ЭЭГ. Гипотеза эксперимента заключалась в том, что во время переживания векции при увеличении скорости вращения стимуляции будет наблюдаться увеличение спектральной мощности бета-ритма в затылочных отделах и снижение спектральной мощности альфа-ритма в теменных отделах. Модуляции альфа-ритма и бета-ритма во время переживания иллюзии движения собственного тела рассматривались с точки зрения их взаимосвязей с процессами взаимного торможения между зрительной и вестибулярной системами (Palva et al., 2007).

Испытуемыми стали 11 человек (7 женщин, 4 мужчины, средний возраст составил 22 года). Все испытуемые имели нормальное или скорректированное до нормального зрение и не имели травм головного мозга.

Стимуляция представляла собой виртуальный цилиндр — оптокинетический барабан, внутренняя поверхность которого была окрашена в чередующиеся черные и белые полосы, угловой размер каждой из которых составил 12 угл. градусов. Барабан совершал

вращения вокруг вертикальной оси с угловыми скоростями 30, 45 и 60 угл. град/с. Вращения могли быть по часовой стрелке и против часовой стрелки.

Эксперимент состоял из нескольких предъявлений виртуально вращающегося цилиндра. Каждое вращение занимало 60 с. Как было показано в предыдущих экспериментах (Меньшикова и др., 2018), это время являлось оптимальным для инициации иллюзии достаточной интенсивности, и при этом за 60 с не происходило возникновения дискомфортных симптомов (тошнота, головокружение), препятствующих продолжению эксперимента. Вначале предъявлялся неподвижный цилиндр для ознакомления с виртуальной средой. Эксперимент состоял из экспериментальной и контрольной серии. Экспериментальная серия содержала предъявление 12 вращений — 3 скорости вращения × 2 направления × 2 повторения. В ходе экспериментальной серии во время наблюдения вращения цилиндра испытуемые получали инструкцию свободного осматривания зрительной сцены и сохранения неподвижного положения тела. Контрольная серия содержала 6 предъявлений — 3 скорости × 2 направления × 1 повторение. В ходе контрольной серии испытуемых просили удерживать взгляд по центру экрана и подавлять возникающие прослеживаемые движения глаз. Меньшее количество предъявлений в контрольной серии обусловлено тем, что в пилотной фазе эксперимента было установлено возникновение сильно выраженных дискомфортных симптомов при удержании взора неподвижным. Во время всех серий испытуемые находились в позиции сидя. После каждого предъявления испытуемого просили оценить по шкале от 1 до 10 выраженность иллюзии движения собственного тела и дать самоотчет о возникающих дискомфортных ощущениях. Кроме того, после каждого вращения испытуемые заполняли опросник «Симуляторное расстройство» (Kennedy et al., 1993) для определения уровня возникающего дискомфорта.

Стимуляция предъявлялась с помощью шлема виртуальной реальности HTC Vive с разрешением дисплеев для каждого глаза 1200×1080, угол обзора 110 град. Регистрация мозговой активности велась с помощью энцефалографа «Мицар-ЭЭГ-10/70-201» (ООО «Мицар», Россия) от 19 электродов (Ag/AgCl), расположенных по международной системе 10–20, относительно объединенного ушного электрода. Фильтрация биопотенциалов осуществлялась в диапазоне 0,5–30 Гц, также применялся режекторный фильтр для частоты 50 Гц. Регистрация производилась с частотой 500 Гц.

Таким образом, анализ влияние факторов «Скорость вращения (СВ)» и «Наличие фиксации взгляда (ФВ)» производился по трем типам зависимых переменных — оценки интенсивности иллюзии, результаты опросника «Симуляторное расстройство», данные ЭЭГ.

Анализ изменений в биоэлектрической активности головного мозга происходил по двум группам электродов в соответствии с гипотезой исследования:

- теменным (P3, Pz, P4);
- затылочным (O1, O2).

Данные группы электродов были выбраны в связи с тем, что ранее проведенные нейровизуализационные исследования показали, что наблюдения оптокинетической стимуляции, индуцирующей появлению векции, не только повышает активацию зрительной коры, но и деактивирует теменные отделы и теменно-островковую зону, имеющие отношение к обработке вестибулярной информации (Dietrich et al., 2000). Для анализа данных ЭЭГ по каждой экспериментальной серии с помощью быстрого Фурье-преобразования был построен спектр мощности в зависимости от частоты. Затем спектры усреднялись между испытуемыми, и в результате для каждой серии был получен свой спектр.

С применением двухфакторного дисперсионного анализа с повторными измерениями было обнаружено значимое влияние фактора «СВ» на зависимые переменные «Интенсивность иллюзии» ($F = 5,787$, $df = 2$, $p = 0,041$) (рис. 1), «Общий балл опросника» ($F = 8,904$, $df = 2$, $p = 0,17$) (рис. 2) и «Мощность альфа-ритма по отведению Pz» ($F = 4,984$, $df = 2$, $p = 0,021$) (рис. 3).

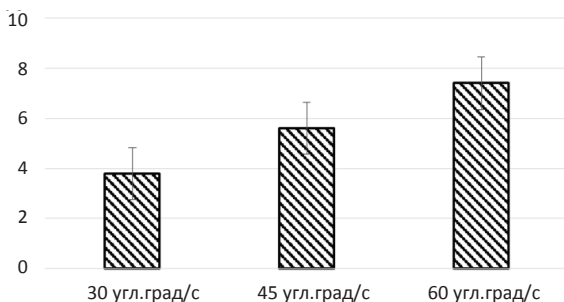


Рис. 1. Средние значения оценок интенсивности иллюзии движения собственного тела при различных скоростях вращения стимула

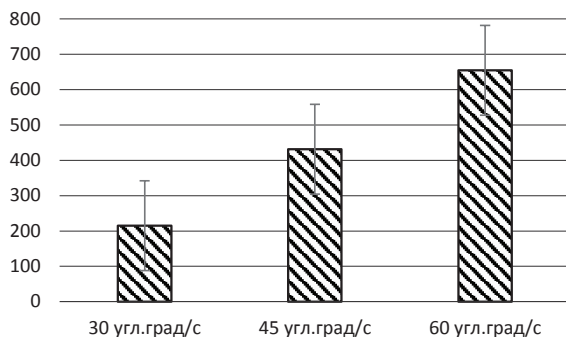


Рис. 2. Средние значения общего балла опросника «Симуляторное расстройство» при различных скоростях вращения стимула

Влияние данного фактора на мощность альфа- и бета-ритмов по другим отведениям электроэнцефалограммы выявлено не было. Также не было обнаружено значимого влияния фактора ФВ ($F = 0,038$, $df = 2$, $p = 0,849$) и взаимодействия факторов ФВ и СВ ($F = 2,486$, $df = 2$, $p = 0,153$) (рис.1).

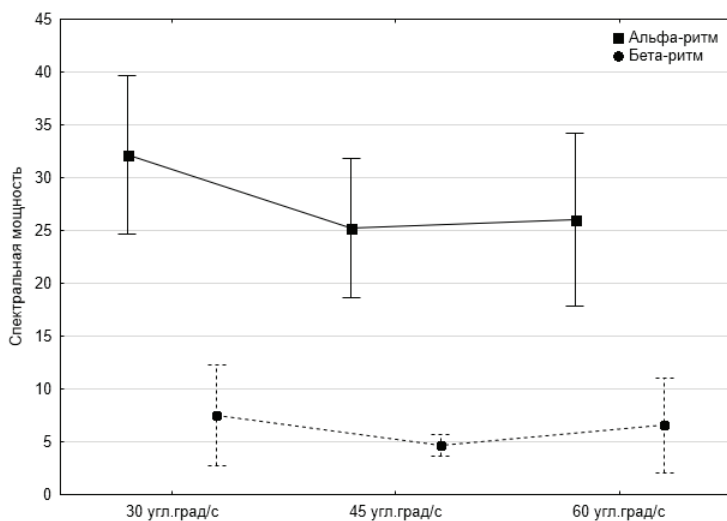


Рис. 3. Средние значения спектральной мощности при различных скоростях вращения

Было обнаружено, что увеличение скорости вращения виртуального оптокинетического барабана при всех условиях наблюдения стимуляции приводило к увеличению выраженности иллюзии. Опросник «Симуляторные расстройства» показал, что значение общего балла в среднем также становится выше при увеличении скорости вращения. Детальный анализ значений выраженности векции позволил выделить две группы испытуемых — первая группа (5 человек) имели значения интенсивности иллюзии при всех скоростях вращения выше 5 баллов из 10, вторая группа (6 человек) при некоторых условиях предъявления стимуляции указывали интенсивность иллюзии менее 5 баллов из 10.

Оценка результатов влияния фактора «СВ» и «ФВ» с учетом разделения испытуемых на две группы позволила установить значимое воздействие фактора ФВ на переменную «Мощность бета-ритма по отведению О1» ($F = 7,593$, $df = 2$, $p = 0,028$). Было установлено, что в сериях с фиксацией взгляда у испытуемых из группы с высокими показателями выраженности иллюзии мощность бета-ритма выше (рис. 4), чем у испытуемых в группе с низкими оценками интенсивности иллюзии (рис. 5). При этом различий между группами в сериях без фиксации взгляда обнаружено не было.

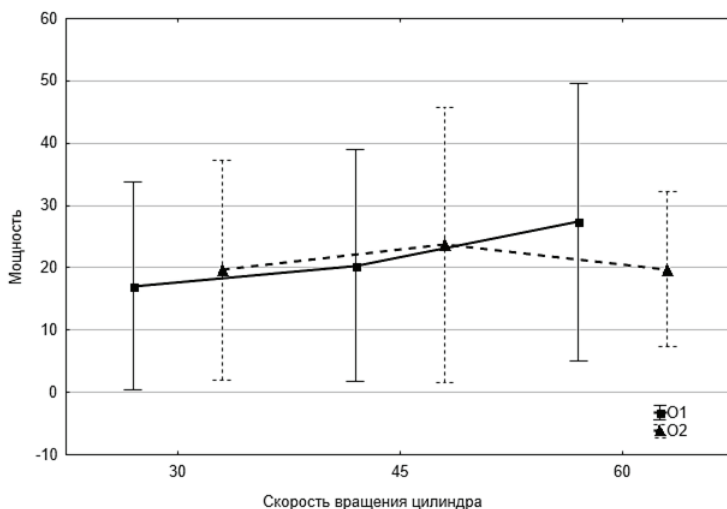


Рис. 4. Средние значения спектральной мощности бета-ритмов в группе испытуемых с высокими показателями выраженности векции

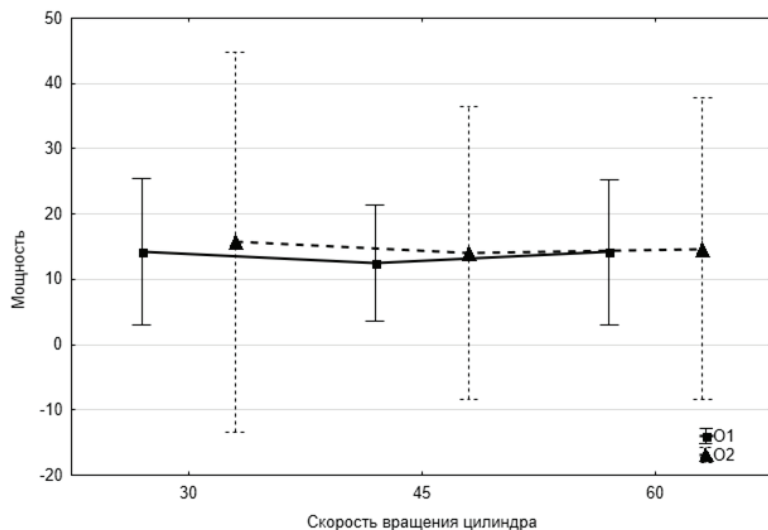


Рис. 5. Средние значения спектральной мощности бета-ритмов в группе испытуемых с низкими показателями выраженности векции

Полученные результаты подтверждают выдвинутую экспериментальную гипотезу о том, что изменения в выраженности иллюзии движения собственного тела имеют отражения в изменении ритмов электроэнцефалограммы. Кроме того, обнаруженное увеличение выраженности иллюзии и дискомфортных ощущениях с ростом скорости вращения находятся в соответствии с результатами схожих исследований по изучению круговой векции (Меньшикова и др., 2018; Palmisano et al., 2015), что подтверждает валидность экспериментальной процедуры в отношении инициации иллюзии различной степени интенсивности. Однако, обращает на себя внимание тот факт, что в среднем фактор ФВ не оказал значимого влияния на зависимые переменные. То есть предъявления стимуляции при инструкции фиксировать взгляд в центре зрительного поля не оказали провокативного эффекта по отношению к векции, как того требуют положения глазодвигательной теории о возникновении иллюзии движения собственного тела Ш. Эбенгольца. В качестве объяснения данного эффекта можно выдвинуть два предположения. Во-первых, стимуляция в настоящем эксперименте предъявлялась в шлеме виртуальной реальности, а не на широкоформатном экране, как

это чаще всего делалось в экспериментах, посвященных изучению глазодвигательной теории. В шлеме виртуальной реальности в силу небольшого физического расстояния от глаз наблюдателя до экрана шлема пользователь не совершает высокоамплитудных прослеживающих движений глаз в сравнении с ситуацией наблюдения стимула на большом экране. Тем самым ситуации устойчивой фиксации взора в середине зрительного поля и свободного осмотра сцены различаются незначительно. Во-вторых, предпринятое разделение выборки на две группы показывает, что только часть испытуемых действительно испытывали иллюзию высокой степени интенсивности. Тогда как другая группа переживала векцию небольшой выраженности в целом во всех условиях наблюдения. Этот факт свидетельствует в пользу того, что для ряда испытуемых оба уровня фактора ФВ оказались не отличающимися по причине наличия выработанных механизмов адаптации к наблюдению подобных стимулов.

Наибольший интерес представляют различия, обнаруженные в биоэлектрической активности головного мозга. Было обнаружено снижение мощности альфа-ритма в теменной области с ростом скорости вращения. С учетом значимого увеличения выраженности иллюзии при этом, можно говорить о снижении мощности активности в альфа-диапазоне при переживании векции. Подобное снижение может быть интерпретировано с точки зрения изменения зрительно-вестибулярных взаимодействий при возникновении иллюзии. Иллюзия движения собственного тела возникает в тот момент, когда наблюдатель склонен интерпретировать зрительный стимул как неподвижный, а свое тело, напротив, находящимся в движении. Для этого необходимо снижение веса вестибулярного сигнала в механизме сенсорного конфликта. Уменьшение активации теменной области иллюстрирует такое подавление обработки поступающей вестибулярной информации. Схожий результат был получен в эксперименте С. Харквила с коллегами (Harquel et al., 2019), обнаруживших десинхронизацию альфа-ритма в теменном отделе в момент, предшествующий нажатию испытуемым кнопки манипулятора для сигнализации о возникновении иллюзии. Однако авторы отметили, что такое снижение альфа-активности имело место только при вертикальном положении испытуемого. При наблюдении стимула в горизонтальном положении лежа на спине данный эффект не наблюдался. С другой стороны, исследования с использованием комбинации МРТ и ЭЭГ технологий установили, что уровень окси-

генации крови отрицательно коррелирует с мощностью альфа-ритма (Feige et al., 2005; Goldman et al. 2002; Laufs et al., 2003; Scheeringa et al., 2009). Согласно этому факту, депрессия альфа-ритма должна представлять собой увеличение интенсивности обработки информации теменными отделами. Однако, важно отметить, что изменений в активности на уровне бета-ритма в этих корковых областях обнаружено не было, что не позволяет достоверно говорить о наличии повышенной активации теменных зон.

Изменения в активности мозга на уровне бета-ритма были обнаружены только у группы с высокими значениями интенсивности иллюзии и только в серии с инструкцией фиксировать взор по центру виртуального пространства. Было обнаружено, что мощность бета-ритма в этих условиях значимо увеличивается. Увеличение активации на уровне бета-ритма принято рассматривать с точки зрения повышения уровня внимания при выполнении зрительных задач. Так, подобные изменения наблюдались в зрительной коре кошек в момент, когда они прослеживали движение руки экспериментатора с кормом (Wrobel et al., 1998). Аналогичные результаты были получены в серии экспериментов на обезьянах при выполнении ими задач на удержание взора на требуемых объектах (Graile et al., 1996). Гипотеза о том, что увеличение активности на уровне бета-ритма в зрительной коре связана с механизмами удержания произвольного внимания была также детально рассмотрена и частично подтверждена в серии экспериментов с участием людей (Wrobel et al., 1998). В ходе этих работ было показано, что активация зрительной коры представляет собой способ кортикального контроля над работой таламических структур по удержанию объектов в поле зрения наблюдателя. В связи с этим, обнаруженная в настоящем эксперименте активация затылочной коры левого полушария на уровне бета-ритма в условиях фиксации взора по центру виртуальной сцены может рассматриваться как индикатор повышения зрительного внимания. Однако, важно отметить, что данное повышение было обнаружено только в группе испытуемых с высокими значениями интенсивности иллюзии. Можно предположить, что для данной группы испытуемых задача удержания взора по центру виртуальной сцены оказалась более сложной в связи с развивающейся иллюзией. В ряде экспериментов было показано, что при переживании иллюзии высокой степени интенсивности, в движениях глаз наблюдается появление высокоамплитудных и высокочастотных комплексов, представляющих собой механизм

сенсорной перенормировки (Menshikova et al., 2014). Это означает, что в условиях инструкции фиксировать взгляд в группе испытуемых с более высокими показателями интенсивности иллюзии могли наступить сложности в удержании взора в связи с необходимостью запуска высокочастотных движений глаз. Дополнительные усилия по удержанию глаз неподвижными и повышению зрительного внимания к центру сцены отразилось в увеличении мощности бета-ритма в затылочной области.

Таким образом, в ходе проведенных экспериментов было показано, что переживание иллюзии движения собственного тела, индуцированной наблюдением стимуляции в системе виртуальной реальности, имело свое отражение в изменении биоэлектрической активности головного мозга. Выдвинутая гипотеза о снижении спектральной мощности альфа-ритма в теменных отделах с ростом скорости вращения подтвердилась. Увеличение мощности бета-ритма в затылочных отделах было обнаружено только в контрольной серии при фиксации взора по центру виртуальной сцены. Обнаруженное увеличение интенсивности иллюзии с ростом скорости вращения доказывает валидность используемой среды виртуальной реальности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

Барабанищikov, В.А., Белопольский, В.И. Стабильность видимого мира. М.: Изд-во «Институт психологии РАН», 2008.

Меньшикова, Г.Я., Ковалёв, А.И. Векция в виртуальных средах: психологические и психофизиологические механизмы формирования // Национальный психологический журнал. 2015 № 4. Т. 20. С. 91–104.

Меньшикова, Г.Я., Ковалёв, А.И. Роль нистагменных движений глаз в формировании иллюзии движения собственного тела // Вестник Московского университета. Серия 14. Психология, 2018. № 4. С. 135–148.

Berti, S., Haycock, B., Adler, J., Keshavarz, B. (2019) Early cortical processing of vection-inducing visual stimulation as measured by event-related brain potentials (ERP). *Displays*, 58, 56–65.

Dieterich, M., Brandt, T. (2000) Brain activation studies on visual-vestibular and ocular motor interaction. *Current Opinion in Neurology*, 13 (1), 13–18.

Ebenholtz, S. M., Cohen, M. M., Linder, B.J. (1994) The possible role of nystagmus in motion sickness: a hypothesis. *Aviation, space, and environmental medicine*, 65 (11), 1032–1035.

Feige, B., Scheffler, K., Esposito, F., Di Salle, F., Hennig, J., Seifritz, E. (2005) Cortical and subcortical correlates of electroencephalographic alpha rhythm modulation. *Journal of neurophysiology*, 93 (5), 2864–2872.

Goldman, R.I., Stern, J.M., Engel, Jr.J., Cohen, M.S. (2002) Simultaneous EEG and fMRI of the alpha rhythm. *Neuroreport*, 13 (18), 2487.

Graille C., Rougeul-Buser A. (1996) Posterior parietal electrocortical (ECoG) 'attention rhythms' in macaque during a visually guided manual task // *European Journal of Neuroscience Supplement*, 9, 122.

Harquel, S., Guerraz, M., Barraud, P.A., Cian, C. (2020) Modulation of alpha waves in sensorimotor cortical networks during self-motion perception evoked by different visual-vestibular conflicts. *Journal of Neurophysiology*, 123 (1), 346–355.

Kennedy, R.S., Lane, N.E., Berbaum, K.S., Lilienthal, M.G. (1993) Simulator sickness questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness. *The international journal of aviation psychology*. 3 (3), 203–220.

Keshavarz, B., Berti, S. (2014) Integration of sensory information precedes the sensation of vection: a combined behavioral and event-related brain potential (ERP) study. *Behavioural brain research*, 259, 131–136.

Kleinschmidt, A., Thilo, K.V., Büchel, C., Gresty, M.A., Bronstein, A.M., Frackowiak, R.S. (2002) Neural correlates of visual-motion perception as object-or self-motion. *Neuroimage*, 16 (4), 873–882.

Laufs, H., Kleinschmidt, A., Beyerle, A., Eger, E., Salek-Haddadi, A., Preibisch, C., Krakow (2003), K. EEG-correlated fMRI of human alpha activity. *Neuroimage*, 19 (4), 1463–1476.

Loomis, J. M., Philbeck, J. W. (2006) Measuring spatial perception with spatial updating and action. In *Carnegie Symposium on Cognition*. (Eds.). (pp. 1–42). Pittsburgh, PA, US. Psychology Press.

Menshikova, G., Kovalev, A., Klimova, O., Chernorizov, A., Leonov, S. (2014) Testing the vestibular function development in junior figure skaters using the eye tracking technique. *Procedia-Social and behavioral sciences*, 146, 252–258.

Moser, M.B., Moser, E.I. (1998) Distributed encoding and retrieval of spatial memory in the hippocampus. *Journal of Neuroscience*, 18 (18), 7535–7542.

Palmisano, S., Barry, R.J., De Blasio, F.M., Fogarty, J.S. (2016) Identifying objective EEG based markers of linear vection in depth. *Frontiers in psychology*, 7, 1205.

Palva, S., Palva, J.M. (2007) New vistas for α -frequency band oscillations. *Trends in neurosciences*, 30 (4), 150–158.

Reason, J. T., Brand, J. J. (1975) *Motion sickness*. Academic press.

Scheeringa, R., Petersson, K.M., Oostenveld, R., Norris, D.G., Hagoort, P., Bastiaansen, M.C. (2009) Trial-by-trial coupling between EEG and BOLD identifies networks related to alpha and theta EEG power increases during working memory maintenance. *Neuroimage*, 44 (3), 1224–1238.

Thilo, K.V., Kleinschmidt, A., Gresty, M.A. (2003) Perception of self-motion from peripheral optokinetic stimulation suppresses visual evoked responses to central stimuli. *Journal of neurophysiology*, 90 (2), 723–730.

Tosto, M.G., Hanscombe, K.B., Haworth, C.M., Davis, O.S., Petrill, S.A., Dale, P.S., Kovas, Y. (2014) Why do spatial abilities predict mathematical performance? // *Developmental science*, 2014, 17 (3), 462–470.

Ventura, M., Shute, V., Wright, T. J., Zhao, W. (2013) An investigation of the validity of the virtual spatial navigation assessment. *Frontiers in psychology*, 4, 852.

Wróbel A., Hedström A., Lindström S. (1998) Synaptic excitation of principal cells in the cat's lateral geniculate nucleus during focal epileptic seizures in the visual cortex // *Acta neurobiologiae experimentalis*, 58, 271–276.

REFERENCES:

Barabanshchikov, V. A., Belopol'skij, V. I. (2013). Stabil'nost' vidimogo mira. (in Russ)

Berti, S., Haycock, B., Adler, J., & Keshavarz, B. (2019). Early cortical processing of vection-inducing visual stimulation as measured by event-related brain potentials (ERP). *Displays*, 58, 56–65.

Dieterich, M., & Brandt, T. (2000). Brain activation studies on visual-vestibular and ocular motor interaction. *Current Opinion in Neurology*, 13, 1, 13–18.

Ebenholtz, S. M., Cohen, M. M., & Linder, B. J. (1994). The possible role of nystagmus in motion sickness: a hypothesis. *Aviation, space, and environmental medicine*, 65, 11, 1032–1035.

Feige, B., Scheffler, K., Esposito, F., Di Salle, F., Hennig, J., & Seifritz, E. (2005). Cortical and subcortical correlates of electroencephalographic alpha rhythm modulation. *Journal of neurophysiology*, 93, 5, 2864–2872.

Goldman, R. I., Stern, J. M., Engel Jr, J., & Cohen, M. S. (2002). Simultaneous EEG and fMRI of the alpha rhythm. *Neuroreport*, 13, 18, 2487.

Graille C., & Rougeul-Buser A. (1996) Posterior parietal electrocortical (ECoG) 'attention rhythms' in macaque during a visually guided manual task. *European Journal of Neuroscience Supplement*, 9, 22.

Harquel, S., Guerraz, M., Barraud, P. A., & Cian, C. (2020). Modulation of alpha waves in sensorimotor cortical networks during self-motion perception evoked by different visual-vestibular conflicts. *Journal of Neurophysiology*, 123, 1, 346–355.

Kennedy, R. S., Lane, N. E., Berbaum, K. S., & Lilienthal, M. G. (1993). Simulator sickness questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness. *The international journal of aviation psychology*, 3, 3, 203–220.

Keshavarz, B., & Berti, S. (2014). Integration of sensory information precedes the sensation of vection: a combined behavioral and event-related brain potential (ERP) study. *Behavioural brain research*, 259, 131–136.

Kleinschmidt, A., Thilo, K. V., Büchel, C., Gresty, M. A., Bronstein, A. M., & Frackowiak, R. S. (2002). Neural correlates of visual-motion perception as object- or self-motion. *Neuroimage*, 16, 4, 873–882.

Laufs, H., Kleinschmidt, A., Beyerle, A., Eger, E., Salek-Haddadi, A., Preibisch, C., & Krakow, K. (2003). EEG-correlated fMRI of human alpha activity. *Neuroimage*, 19, 4, 1463–1476.

Loomis, J. M., & Philbeck, J. W. (2008). Measuring spatial perception with spatial updating and action. In *Carnegie Symposium on Cognition, 2006*, Pittsburgh, PA, US. Psychology Press.

Men'shikova, G. YA., & Kovalev, A. I. (2018). Rol' nistagmnennyh dvizhenij glaz v formirovanii illyuzii dvizheniya sobstvennogo tela. Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 14: Psihologiya, 4, 135–148. (in Russ)

Men'shikova, G. YA., & Kovalyov, A. I. (2015). Vekciya v virtual'nyh sredah: psihologicheskie i psihofiziologicheskie mekhanizmy formirovaniya. Nacional'nyj psihologicheskij zhurnal, 4, 20, 91–104. (in Russ)

Menshikova, G., Kovalev, A., Klimova, O., Chernorizov, A., & Leonov, S. (2014). Testing the vestibular function development in junior figure skaters using the eye tracking technique. Procedia–Social and behavioral sciences, 146, 252–258.

Moser, M. B., & Moser, E. I. (1998). Distributed encoding and retrieval of spatial memory in the hippocampus. Journal of Neuroscience, 18, 18, 7535–7542.

Palmisano, S., Barry, R. J., De Blasio, F. M., & Fogarty, J. S. (2016). Identifying objective EEG based markers of linear vection in depth. Frontiers in psychology, 7, 1205.

Palva, S., & Palva, J. M. (2007). New vistas for α -frequency band oscillations. Trends in neurosciences, 30, 4, 150–158.

Reason, J. T., & Brand, J. J. (1975). Motion sickness. Academic press.

Scheeringa, R., Petersson, K. M., Oostenveld, R., Norris, D. G., Hagoort, P., & Bastiaansen, M. C. (2009). Trial-by-trial coupling between EEG and BOLD identifies networks related to alpha and theta EEG power increases during working memory maintenance. Neuroimage, 44, 3, 1224–1238.

Thilo, K. V., Kleinschmidt, A., & Gresty, M. A. (2003). Perception of self-motion from peripheral optokinetic stimulation suppresses visual evoked responses to central stimuli. Journal of neurophysiology, 90, 2, 723–730.

Tosto, M. G., Hanscombe, K. B., Haworth, C. M., Davis, O. S., Petrill, S. A., Dale, P. S., & Kovas, Y. (2014). Why do spatial abilities predict mathematical performance? Developmental science, 17 (3), 462–470.

Ventura, M., Shute, V., Wright, T. J., & Zhao, W. (2013). An investigation of the validity of the virtual spatial navigation assessment. Frontiers in psychology, 4, 852.

Wróbel A., Hedström A., & Lindström S. (1998) Synaptic excitation of principal cells in the cat's lateral geniculate nucleus during focal epileptic seizures in the visual cortex. Acta neurobiologiae experimentalis. 58, 271–276.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ковалёв Артём Иванович — кандидат психологических наук, доцент факультета психологии МГУ имени М.В. Ломоносова. E-mail: artem.kovalev.msu@mail.ru

Рогачев Антон Олегович — студент факультета психологии МГУ имени М.В. Ломоносова. E-mail: a.o.rogachev@yandex.ru

Климова Оксана Анатольевна — кандидат психологических наук, н.с. факультета психологии МГУ имени М.В. Ломоносова. E-mail: Okli07@yandex.ru

Гасимов Антон Фаритович — старший преподаватель факультета психологии МГУ имени М.В. Ломоносова. E-mail: Gasimov.anton@gmail.com

ABOUT THE AUTHORS:

Artem I. Kovalev — PhD in Psychology, associate professor in the Psychology Faculty, Lomonosov Moscow State University. E-mail: artem.kovalev.msu@mail.ru

Anton O. Rogachev — student in the Psychology Faculty, Lomonosov Moscow State University. E-mail: a.o.rogachev@yandex.ru

Oksana A. Klimova — PhD in Psychology, Research Assistant, Psychology Faculty, Lomonosov Moscow State University. E-mail: Okli07@yandex.ru

Anton F. Gasimov — Chief-lecturer, Psychology Faculty, Lomonosov Moscow State University. E-mail: Gasimov.anton@gmail.com