

ВЗАИМОСВЯЗЬ ФИЗИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ И ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СВЯЗАННОСТИ МОЗГА

И.В. Фекличева¹, Н.А. Чипеева¹, И.М. Захаров²,
Е.П. Масленникова¹, В.И. Исмагуллина²

¹Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия,

²Психологический институт РАО, г. Москва, Россия

Цель исследования. Изучить взаимосвязь между физической активностью и характеристиками функциональной связанности (ФС) на основе данных электроэнцефалограммы (ЭЭГ). **Материалы и методы.** В выборку исследования вошли 43 здоровых респондента в возрасте от 17 до 35 лет (26 женщин). Участники были поделены на две группы. Первая группа (21 человек) – участники, занимающиеся физической активностью более 3 ч в неделю, вторая (22 человека) – участники, не занимающиеся физической активностью. У всех участников регистрировалась ЭЭГ в состоянии покоя в течение 10 мин. Для оценки различий глобальных характеристик ФС мозга были выбраны такие метрики графа, как характеристическая длина пути, коэффициент кластеризации, индекс тесного мира и модулярность. **Результаты.** Были получены достоверные различия между двумя группами по величине кластерного коэффициента с помощью критерия Вилкоксона ($W = 201$, $p < 0,001$). Для сравнения межгрупповых различий также использовалась процедура ДОТ (двойной односторонний тест), которая позволила оценить эквивалентность групп на основе заранее выбранного размера эффекта. При сравнении двух групп наблюдаются статистически значимые различия для двух односторонних тестов Стьюдента, при этом наблюдаемый размер эффекта превышает заранее выбранный размер эффекта ($d = 0,05$) как для верхней, так и для нижней границы, что говорит не только о статистической значимости, но и о неэквивалентности выборок. **Заключение.** У молодых людей, регулярно занимающихся физической активностью более 3 часов в неделю, ФС мозга выше, чем у людей того же возраста, не занимающихся физической активностью, по такому показателю, как коэффициент кластеризации. В целом результаты настоящего исследования показывают, что физическая активность увеличивает ФС мозга в альфа-диапазоне, причем связанность увеличивается за счет появления новых функциональных кластеров внутри уже существующих ассоциаций мозговых регионов.

Ключевые слова: физическая активность, функциональная связанность, электроэнцефалограмма.

Введение. Количество физической активности в повседневной жизни является важным аспектом нормального функционирования человека, позволяющим ему легче адаптироваться к постоянно изменяющимся условиям жизни. Несмотря на то, что исследования физической активности прежде всего рассматриваются с точки зрения физического здоровья, в настоящее время большой пласт работ посвящен исследованиям комплексного влияния физической активности как на физиологическое, так и на психологическое состояние человека. Исследователи подчеркивают положительную связь физической активности и различных аспектов благополучия человека [37], высокой стрессоустойчивости, низкого уровня тревожности и депрессии [34]. Ряд исследований посвящен связи когнитивной сфе-

ры и физической активности в разных возрастах [2, 18, 31]. Вместе с тем большая доля исследований посвящена изучению важной роли физической активности в снижении рисков когнитивного угасания, связанного с возрастными физиологическими изменениями [32, 33].

Комплексный характер положительного влияния физической активности также подтверждается данными нейровизуализации мозга. Исследования как структурных (анатомических) особенностей, так и функциональных характеристик активности мозга демонстрируют зависимость от уровня физической активностью [21, 38].

Изменения структурных характеристик мозга вследствие активной физической деятельности связывают с процессами нейропла-

стичности. Повышенный уровень физической активности связывают с увеличением размеров серого вещества в ряде областей мозга (в первую очередь, в моторных областях коры и гиппокампе [15, 17]), а также с увеличением количества волокон белого вещества (включая волокна мозолистого тела, лучистого венца и верхнего продольного пучка конечного мозга [17]) и изменением их микроструктуры [4]. Физическая активность связана с изменениями структурных характеристик как в детском [3], так и в среднем и пожилом возрасте [12].

Важная роль в понимании механизмов воздействия физической нагрузки на работу мозга принадлежит исследованиям функциональных характеристик мозговой активности, в частности, оценке изменений функциональной связанности мозга. Под функциональной связанностью понимают характеристику отношений между анатомически различными, пространственно близкими или удаленными областями мозга, которые взаимодействуют через спонтанную или вызванную синхронизацию для достижения реализации сложной психической функции [39, 20]. Показатели связанности мозга могут быть определены как на основании данных, полученных во время какой-либо деятельности, так и в состоянии покоя (спокойного бодрствования без выполнения каких-либо заданий). Анализ синхронизованной активации (в первую очередь синхронизованного во времени потребления кислорода в мозге на основе фМРТ-данных) в разных областях мозга позволил выделить несколько сетей, имеющих специфические функции. Так, выделяют отдельные стабильные (совпадающие по локализации в различных исследованиях) сети, активные в состоянии покоя: сеть пассивного режима работы мозга, моторная и сенсорная сети, сеть обработки актуальной информации, фронтально-париетальная сеть и другие [39]. Анализ паттернов функциональной связанности как внутри этих сетей, так и между ними и другими регионами мозга позволяет изучить, как под действием физической нагрузки меняется взаимодействие различных мозговых областей.

Согласно ряду исследований, моторная активность людей, профессионально занимающихся физической активностью, индуцирует изменения функциональной связанности покоя внутри и между регионами мозга, которые типично вовлечены в моторную активность (мозжечок, фронтально-париетальная сеть

и сенсомоторные регионы и моторная сеть) [5, 6, 9, 13, 19, 24, 28].

Кроме выделения сетей в мозге на основании их ко-активации для анализа изменений работы мозга в целом в ответ на физическую нагрузку перспективным является подход, связанный с поиском системных и глобальных характеристик нейрональной активности. Глобальные характеристики функциональной связанности оцениваются на основе математического понятия связанности между компонентами графа – совокупности объектов и связей между ними. Графы нейронных сетей могут быть описаны с помощью таких показателей, как количество вершин (узлов) графа, коэффициент кластеризации, модулярность, средняя длина пути между узлами, мера центральности вершин и число ребер графа [1]. В многочисленных работах было показано, что получаемые на основе теории графов метрики связанности мозговой активности очень стабильны для конкретного человека [22], коррелируют с когнитивными способностями человека [7, 11], могут использоваться для прогнозирования различных черт личности (например, темперамента или творчества [25]), а также связаны с психопатологическими состояниями [23].

При этом в настоящее время вопрос о том, как изменяются глобальные характеристики нейрональной динамики в ответ на физическую нагрузку, остается малоизученным. Исследования взаимосвязи физической активности и функциональной связанности, интерпретированные с применением теории графов, могут позволить проанализировать стабильные для состояния пассивного режима работы мозга изменения показателей глобальной нейрональной динамики в ответ на физическую нагрузку.

Для оценки характеристик глобальной связанности мозга в нашем исследовании нами выбран метод регистрации ЭЭГ в связи с тем, что высокое временное разрешение этого метода позволит нам проанализировать активность мозга в разных частотных диапазонах, потенциально имеющих разный вклад в обработку сенсомоторной информации в мозге [27].

Цель исследования: изучить взаимосвязь между физической активностью и характеристиками функциональной связанности на основе данных ЭЭГ.

Материалы и методы. В исследовании приняли участие 55 человек от 17 до 35 лет.

На основе проведенного опроса о вовлеченности в физическую активность в итоговую выборку исследования вошли 43 здоровых респондента (26 женщин), часть участников (12 человек) не вошли в итоговую выборку, так как не указали время, которое они затрачивают на физическую активность. Участники исследования были поделены на две группы, в первую группу вошли 21 человек – участники, занимающиеся физической активностью более 3 часов в неделю, во вторую – 22 человека, не занимающиеся физической активностью. Все участники не имели в анамнезе неврологических и психиатрических расстройств и травм головы.

Процедура. Первоначально все участники проходили самоотчет о своей вовлеченности в физическую активность. Респондентам необходимо было оценить, могут ли они причислить себя к людям, занимающимся физической активностью, а также оценить время, которое они затрачивают на эту активность. У всех участников регистрировалась ЭЭГ в состоянии покоя. Регистрация электроэнцефалограммы осуществлялась в состоянии покоя в течение 10 мин (по 2 мин открытые и закрытые глаза). Данные ЭЭГ записывались с 64 активных электродов, размещенных по международной системе 10-10 с усилителем ActiChamp Brain Products (Brain Products, Мюнхен, Германия). Все эксперименты проводились в звуконепроницаемой и электрически экранированной комнате с тусклым освещением. Диапазон сопротивления был от 0 до 25 kOhm. Для непрерывной записи без какой-либо фильтрации и непрерывного отбора проб на частоте 500 Гц использовалась система сбора данных Brain Products PyCorder. Электрод сравнения находился на Cz. После записи данных и снижения частоты дискретизации до 256 Гц данные были отфильтрованы от 0,1 до 30 Гц, затем был проведен анализ. Далее данные вручную очищались от артефактов с исключением шумных каналов. Для удаления артефактов моргания и вертикального движения глаз был проведен независимый компонентный анализ на следующих электродах: VEOG – Fp1, НЕОГ – FT9 и FT10. После независимого компонентного анализа исключенные каналы были топографически интерполированы и было проведено полуавтоматическое удаление артефактов. Оценка синхронизации ЭЭГ-активности производилась с помощью библиотеки MNE Python [29]. Для оценки силы

связи между каналами использовался метод weighted Phase Lag Index [36], разработанный для минимизации проблемы объемного проведения сигнала в ЭЭГ. Для оценки различий глобальных характеристик функциональной связанности мозга у исследуемых групп сравнивались такие метрики графа, как характеристическая длина пути, коэффициент кластеризации, индекс тесного мира и модулярность в следующих частотных диапазонах: 4–8, 8–13, 13–20, 20–30 Гц. При подсчете метрик графа использовались градуальные веса связей. Для анализа метрик связности использовались связи, значения которых были выше медианного для каждого испытуемого.

Статистическая обработка данных была проведена в среде статистического программирования R [35]. Для описания распределения и оценки различий метрик графа у исследуемых групп использовались критерий Вилкоксона и двойной односторонний независимый тест (ДОТ, [26]), используемый для решения вопроса о том, может ли быть отвергнута гипотеза о наличии достаточно экстремальных эффектов, которые можно считать значимыми. В настоящей работе минимальный размер эффекта выбран на основе коэффициента d Коэна и равняется $d = 0,5$ (эффект среднего размера по классификации Коэна).

Результаты и обсуждение. Первоначально были посчитаны описательные статистики для групп участников, вовлеченных и не вовлеченных в физическую активность (см. таблицу). В таблице и далее для описания и анализа представлены данные, записанные на частоте 8–13 Гц, так как значимые различия метрик были выявлены только в альфа-диапазоне.

Для иллюстрации полученного распределения значений метрик связности на рис. 1 представлены данные плотности распределения каждой из этих метрик связности у двух групп участников.

Для предварительного анализа различий между группами был использован критерий Вилкоксона. Проведенный анализ показал, что группа испытуемых, занимающихся физической активностью больше 3 ч в неделю, достоверно отличается от группы не занимающихся физической активностью по величине кластерного коэффициента по критерию Вилкоксона ($W = 201$, $p < 0,001$). Полученные результаты представлены на рис. 2.

Описательные статистики для различных метрик связности
у групп респондентов, вовлеченных в спорт (группа I) и не занимающихся спортом (группа II)
Descriptive statistics for connectivity metrics in sports (group I) and non-sports (group II) groups

Наименование метрик связности Connectivity metrics	Группа I / Group I	Группа II / Group II
	Среднее и стандартное отклонение Mean and standard deviation M ± SD	Среднее и стандартное отклонение Mean and standard deviation M ± SD
Кластерный коэффициент Cluster coefficient	0,622 ± 0,035	0,583 ± 0,016
Модулярность Modularity	0,094 ± 0,021	0,097 ± 0,019
Характеристическая длина пути Path length	0,670 ± 0,106	0,700 ± 0,105
Индекс тесного мира Small world index	1,349 ± 0,249	1,523 ± 0,218

Примечание: группа I – участники, занимающиеся физической активностью более 3 часов в неделю, группа II – участники, не занимающиеся физической активностью.

Note: group I – participants engaged in physical activity for more than 3 hours a week, group II – participants not engaged in physical activity.

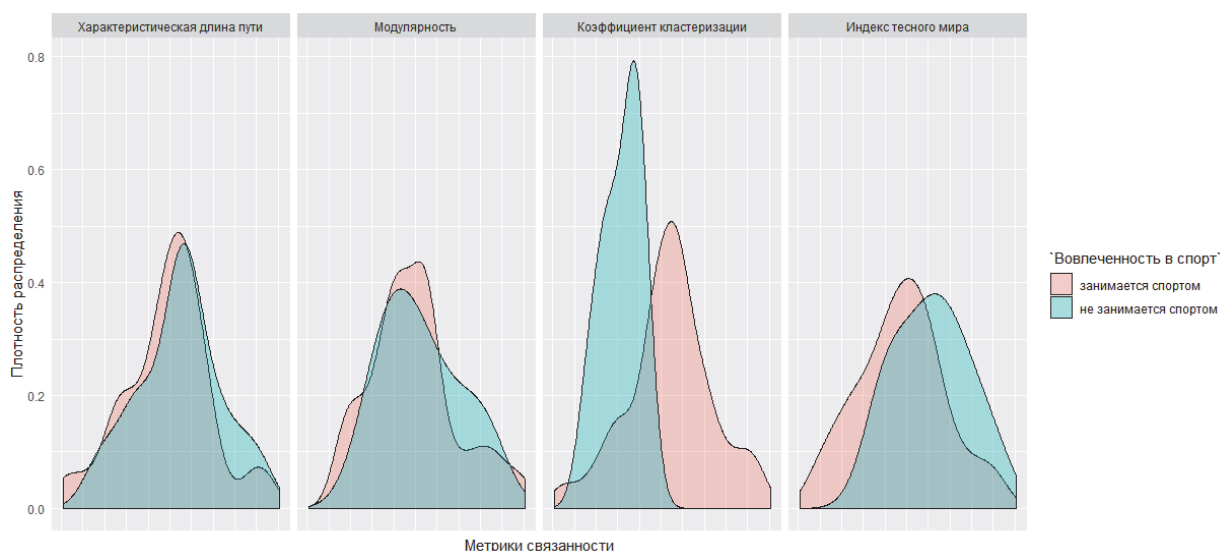


Рис. 1. Плотность распределения значений метрик связанности для групп участников, вовлеченных и не вовлеченных в физическую активность

Fig. 1. Distribution density of connectivity metrics for participants with different levels of physical activity

Для дальнейшего анализа нами была использована процедура ДОТ (двойного одностороннего теста) [26], которая является расширением классических статистических методов, направленных на сравнение межгрупповых различий. Процедура ДОТ позволяет не просто постулировать наличие различий между выборками, но и оценить их эквивалентность на основе заранее выбранного размера эффекта. Результаты ДОТ для различий между группами не занимающихся физической нагрузкой и занимающихся больше 3 ч в неделю по кластерному коэффициенту на частоте 8–13 Гц представлены на рис. 3.

Согласно полученным результатам, при сравнении групп вовлеченных и не вовлеченных в физическую активность наблюдаются статистически значимые различия для двух односторонних тестов Стьюдента (ДОТ – верхнее значение $t = -4,13$, $df = 38$, $p < 0,001$, ДОТ – нижнее значение $t = -1,72$, $df = 38$, $p < 0,954$), при этом наблюдаемый размер эффекта превышает заранее выбранный размер эффекта, равный $d = 0,05$, как для верхней, так и для нижней границы, что говорит не только о статистической значимости, но и о неэквивалентности выборок. Таким образом, на основе имеющихся данных можно сделать вывод

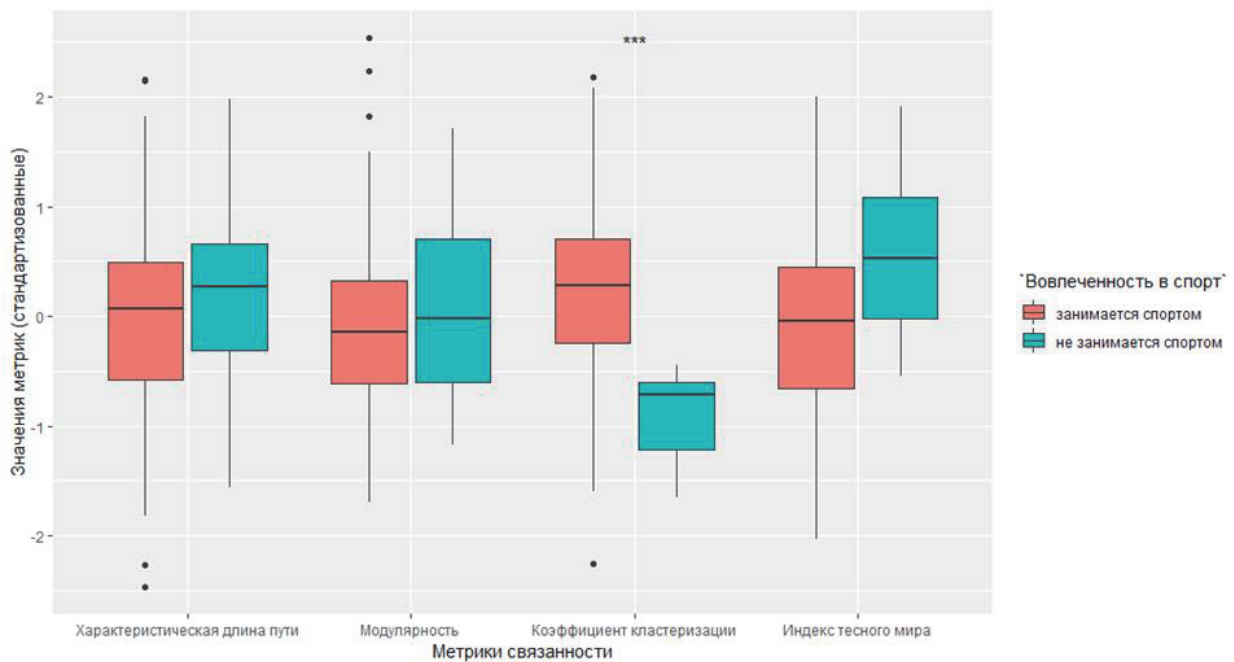


Рис. 2. Медианные значения и разброс значений для метрик связанности в диапазоне. В качестве основы для построения боксплота использовалось медианное значение метрики для каждой группы. Для границы «ящика» использовались значения верхнего и нижнего квартиля распределений. Прямые линии, исходящие из боксплота («усы»), обозначают степени разброса за пределами верхнего и нижнего квартилей, отдельные точки показывают «выбросы» в данных. *** – уровень значимости $p < 0,001$ для теста Вилкоксона

Fig. 2. Boxplots for connectivity metrics for participants with different levels of physical activity. The middle line in the box is median, the edges of the boxes display interquartile range. The lines show the variance outside the quartiles, individual dots represent outliers in the data. *** – represents the Wilcoxon p-value ($p < 0.001$)

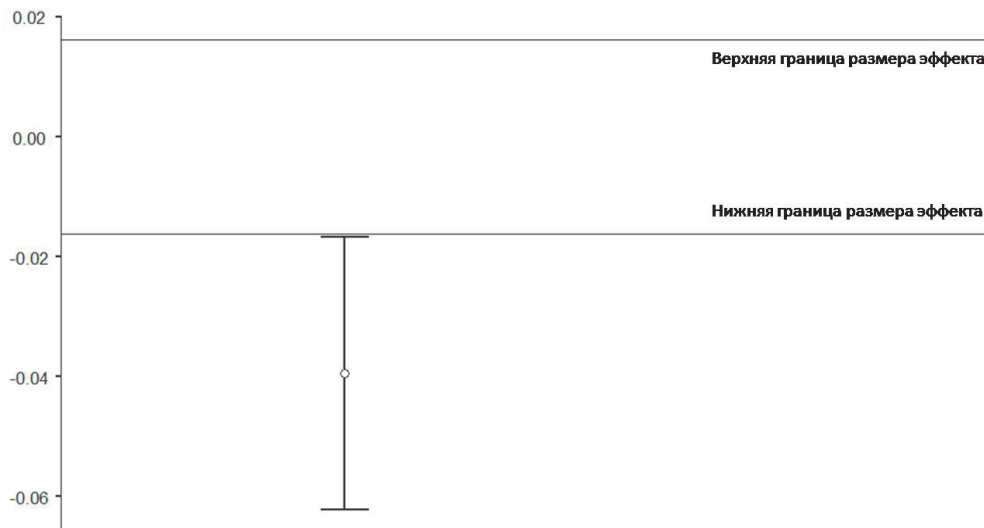


Рис. 3. Оценка разброса различий между группами участников, вовлеченных и не вовлеченных в физическую активность, и минимальных размеров эффекта для значения Коэна $d = 0,5$. Верхнее и нижнее значение размера эффекта в данных подсчитано на основе значений двух односторонних t-тестов Стьюдента. Показаны верхний и нижний размер эффекта для коэффициента Коэна $d = 0,5$

Fig. 3. The effect size ranges for two one-sided test (TOST) procedure with Cohen's $d = 0.5$ minimal effect size. The actual effect size for the data is calculated based on the Student's two one-sided t-test (TOST procedure), and the values for Cohen's $d = 0.5$ are shown

о том, что группа участников, вовлеченных в физическую активность, демонстрирует статистически более высокие показатели коэффициента кластеризации мозговых сетей в диапазоне альфа-ритма, при этом размер эффекта превышает средний по классификации Коэна.

Достоверных различий между данными группами в характеристической длине пути, индексе тесного мира и модулярности во всех исследуемых частотных диапазонах не выявлено (см. рис. 2).

Полученные в исследовании результаты свидетельствуют о том, что у молодых людей, регулярно занимающихся физической активностью более 3 ч в неделю, функциональная связанность мозга выше, чем у людей того же возраста, не занимающихся физической активностью, по такому показателю, как коэффициент кластеризации. В масштабах мозга в целом более высокое значение коэффициента кластеризации означает, что связи графа наиболее плотно сгруппированы вокруг нескольких узлов, более низкие значения этого коэффициента указывают на большую равномерность распределения связей между всеми узлами в мозге [7, 8]. Это согласуется с результатами исследований функциональной связанности мозга по данным фМРТ, в которых показано, что функциональная связанность у людей, профессионально занимающихся спортом, возрастает в основном в пределах сетей, вовлеченных в моторную деятельность. Так, в исследовании G. Li и соавт. [24] был найден более высокий уровень функциональной связанности у опытных танцоров с 10-летним стажем между моторными регионами, и особенно в сенсомоторной коре, а также в кортико-базальных ганглиях, между средней поясной корой, скорлупой, постцентральной и прецентральной извилиной по сравнению со здоровой группой людей, не вовлеченных в физическую активность. Подобная же динамика изменений функциональной связанности обнаружена в исследованиях с краткосрочной физической активностью [5, 28], результаты которых демонстрировали увеличение функциональной связанности покоя в моторных областях, а также во фронтопариетальной нейронной сети. Таким образом, можно предположить, что физическая нагрузка увеличивает плотность связей в пределах уже существующих взаимодействий. Одним из механизмов, формирующих структурную основу таких взаимодействий, является

повышение уровня таких нейротрофических факторов, как BDNF, инсулиноподобного и эндотелиального факторов роста в ответ на физическую нагрузку, что способствует формированию новых связей между соседними узлами и ускорению передачи сигналов между ними [14]. Частотный диапазон 8–13 Гц, в котором нашим исследованием выявлены значимые изменения функциональной связанности мозга под влиянием физической нагрузки, соответствует частотному диапазону, в котором исследованием B. Gutmann и соавт. [16] показано увеличение пиковой частоты под влиянием физической нагрузки. Также известно, что диапазон 8–13 Гц связан не только с альфа-активностью, но и с сенсомоторной активностью (мю-ритмом). Мю-ритм связан как с мысленными представлениями движений [30], так и с индивидуальными различиями в успешности в спортивной деятельности [10].

Заключение. Результаты настоящего исследования показывают, что физическая активность увеличивает функциональную связанность мозга в альфа-диапазоне, причем связанность увеличивается за счет появления новых функциональных кластеров внутри уже существующих ассоциаций мозговых регионов. Необходимо отметить, что полученные нами результаты имеют ряд ограничений. Во-первых, несмотря на наличие статистически значимых различий, позволяющих зафиксировать неэквивалентность групп людей, вовлеченных и не вовлеченных в активную физическую деятельность, в настоящем исследовании численность людей в выборке относительно невелика и предполагает независимое воспроизведение полученных результатов. Во-вторых, в проведенном исследовании вовлеченность в физическую активность рассматривалась вне зависимости от типа физической нагрузки. Оценка специфики взаимосвязи характеристик связанности мозговой активности и различных типов физической нагрузки (аэробной/анаэробной, а также связанной / не связанной с освоением тонких моторных навыков) требует дополнительных исследований.

В целом применение основанного на теории графов сетевого подхода к анализу связанности мозговой активности позволило описать новые закономерности глобальных характеристик мозговой активности, связанных с вовлеченностью в активную физическую деятельность.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект «Нейрофизиологические механизмы индивидуальных различий интеллекта», № 18-013-00944.

Литература / References

1. Евин, И.А. Введение в теорию сложных сетей. Компьютерные исследования и моделирование. 2010. Т. 2. № 2. С. 121–141. [Evin I.A. [Introduction to the Theory of Complex Networks]. *Комп'ютерныуе issledovaniya i modelirovaniye* [Computer Research and Modeling], 2010, vol. 2, no. 2, pp. 121–141. (in Russ.)] DOI: 10.20537/2076-7633-2010-2-2-121-141
2. Chaddock L., Erickson K.I., Prakash R.S. et al. A Neuroimaging Investigation of the Association Between Aerobic Fitness, Hippocampal Volume, and Memory Performance in Peadolescent Children. *Brain research*, 2010, vol. 1358, pp. 172–183. DOI: 10.1016/j.brainres.2010.08.049
3. Chaddock L., Pontifex M.B., Hillman C.H. et al. A Review of the Relation of Aerobic Fitness and Physical Activity to Brain Structure and Function in Children. *Journal of the international Neuropsychological Society*, 2011, vol. 17, iss. 6, pp. 975–985. DOI: 10.1017/S1355617711000567
4. Sexton C.E., Betts J.F., Demnitz N. et al. A systematic Review of MRI Studies Examining the Relationship Between Physical Fitness and Activity and the White Matter of the Ageing Brain. *Neuroimage*, 2016, vol. 131, pp. 81–90. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2015.09.071
5. Albert N.B., Robertson E.M., Miall R.C. The Resting Human Brain and Motor Learning. *Current Biology*, 2009, vol. 19, iss. 12, pp. 1023–1027. DOI: 10.1016/j.cub.2009.04.028
6. Di X., Zhu S., Jin H. et al. Altered Resting Brain Function and Structure in Professional Badminton Players. *Brain connectivity*, 2012, vol. 2, iss. 4, pp. 225–233. DOI: 10.1089/brain.2011.0050
7. Avena-Koenigsberger A., Misisic B., Sporns O. Communication Dynamics in Complex Brain Networks. *Nature Reviews Neuroscience*, 2018, vol. 19, iss. 1, 17 p. DOI: 10.1038/nrn.2017.149
8. Bassett D.S., Sporns O. Network Neuroscience. *Nature neuroscience*, 2017, vol. 20, iss. 3, p. 353. DOI: 10.1038/nrn.4502
9. Bezzola L., Mérillat S., Jäncke L. The Effect of Leisure Activity Golf Practice on Motor Imagery: an fMRI Study in Middle Adulthood. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2012, vol. 6, p. 67. DOI: 10.3389/fnhum.2012.00067
10. Cheron G., Petit G., Cheron J. et al. Brain Oscillations in Sport: Toward EEG Biomarkers of Performance. *Frontiers in Psychology*, 2016, vol. 7, p. 246. DOI: 10.3389/fpsyg.2016.00246
11. Bullmore E.T., Sporns O. The Economy of Brain Network Organization. *Nature Reviews Neuroscience*, 2012, vol. 13, iss. 5, p. 336. DOI: 10.1038/nrn3214
12. Williams V.J., Hayes J.P., Forman D.E. et al. Cardiorespiratory Fitness is Differentially Associated with Cortical Thickness in Young and Older Adults. *NeuroImage*, 2017, vol. 146, pp. 1084–1092. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2016.10.033
13. Karpati F.J., Giacosa J., Foster C. et al. Dance and the Brain: a Review. *Journal of Dance Medicine & Science*, 2015, vol. 19, iss. 3, pp. 128–128. DOI: 10.1111/nyas.12632
14. Ding Q., Ying Z., Gómez-Pinilla F. Exercise Influences Hippocampal Plasticity by Modulating Brain-Derived Neurotrophic Factor Processing. *Neuroscience*, 2011, vol. 192, pp. 773–780. DOI: 10.1016/j.neuroscience.2011.06.032
15. Firth J., Stubbs B., Vancampfort D. et al. Effect of Aerobic Exercise on Hippocampal Volume in Humans: a Systematic Review and Meta-Analysis. *Neuroimage*, 2018, vol. 166, pp. 230–238. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2017.11.007
16. Gutmann B., Mierau A., Hülsdünker T. et al. Effects of Physical Exercise on Individual Resting State EEG Alpha Peak Frequency. *Neural Plasticity*, 2015, vol. 2015. DOI: 10.1155/2015/717312
17. Erickson K.I., Hillman C.H., Kramer A.F. Physical Activity, Brain, and Cognition. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 2015, vol. 4, pp. 27–32. DOI: 10.1016/j.cobeha.2015.01.005
18. Davis C.L., Tomporowski Ph., McDowell J. et al. Exercise Improves Executive Function and Achievement and Alters Brain Activation in Overweight Children: a Randomized, Controlled Trial. *Health Psychology*, 2011, vol. 30, iss. 1, p. 91. DOI: 10.1037/a0021766
19. Wang J., Lu M., Fan Y. et al. Exploring Brain Functional Plasticity in World Class Gymnasts: a Network Analysis. *Brain Structure and Function*, 2016, vol. 221, iss. 7, pp. 3503–3519. DOI: 10.1007/s00429-015-1116-6

20. Fingelkurts A.A., Kähkönen S. Functional Connectivity in the Brain – is it an Elusive Concept? *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 2005, vol. 28, iss. 8, pp. 827–836. DOI: 10.1016/j.neubiorev.2004.10.009
21. Pontifex M.B., Scudder M.R., Drollette E.S. et al. Fit and Vigilant: The Relationship Between Poorer Aerobic Fitness and Failures in Sustained Attention During Preadolescence. *Neuropsychology*, 2012, vol. 26, iss. 4, p. 407. DOI: 10.1037/a0028795
22. Finn E.S., Shen X., Scheinost D. et al. Functional Connectome Fingerprinting: Identifying Individuals Using Patterns of Brain Connectivity. *Nature Neuroscience*, 2015, vol. 18, iss. 11, p. 1664. DOI: 10.1038/nn.4135
23. van den Heuvel M.P., Sporns O. A Cross-Disorder Connectome Landscape of Brain Dysconnectivity. *Nature Reviews Neuroscience*, 2019, p. 1. DOI: 10.1038/s41583-019-0177-6
24. Li G., He H., Huang M. et al. Identifying Enhanced Cortico-Basal Ganglia Loops Associated with Prolonged Dance Training. *Scientific Reports*, 2015, vol. 5, p. 10271. DOI: 10.1038/srep10271
25. Markett S., Weber B., Voigt G. et al. Intrinsic Connectivity Networks and Personality: the Temperament Dimension Harm Avoidance Moderates Functional Connectivity in the Resting Brain. *Neuroscience*, 2013, vol. 240, pp. 98–105. DOI: 10.1016/j.neuroscience.2013.02.056
26. Lakens D., Scheel A.M., Isager P.M. Equivalence Testing for Psychological Research: A Tutorial. *Advances in Methods and Practices in Psychological Science*, 2018, vol. 1, iss. 2, pp. 259–269. DOI: 10.1177/2515245918770963
27. Sockeel S., Schwartz D., Péligrini-Issac M. et al. Large-Scale Functional Networks Identified from Resting-State EEG Using Spatial ICA. *PloS One*, 2016, vol. 11, iss. 1, p. e0146845. DOI: 10.1371/journal.pone.0146845
28. Taubert M., Lohmann G., Margulies D.S. et al. Long-Term Effects of Motor Training on Resting-State Networks and Underlying Brain Structure. *Neuroimage*, 2011, vol. 57, iss. 4, pp. 1492–1498. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2011.05.078
29. Gramfort A., Luessi M., Larson E. et al. MNE Software for Processing MEG and EEG Data. *Neuroimage*, 2014, vol. 86, pp. 446–460. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2013.10.027
30. Pfurtscheller G., Brunner C., Schlögl A. et al. Mu Rhythm (de) Synchronization and EEG Single-Trial Classification of Different Motor Imagery Tasks. *NeuroImage*, 2006, vol. 31, iss. 1, pp. 153–159. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2005.12.003
31. Donnelly J.E., Greene J.L., Gibson C.A. et al. Physical Activity Across the Curriculum (PAAC): a Randomized Controlled Trial to Promote Physical Activity and Diminish Overweight and Obesity in Elementary School Children. *Preventive Medicine*, 2009, vol. 49, iss. 4, pp. 336–341. DOI: 10.1016/j.ypmed.2009.07.022
32. Etgen T., Sander D., Huntgeburth U. et al. Physical Activity and Incident Cognitive Impairment in Elderly Persons: the INVADE Study. *Archives of Internal Medicine*, 2010, vol. 170, iss. 2, pp. 186–193. DOI: 10.1001/archinternmed.2009.498
33. Middleton L.E., Barnes D.E., Lui L.Y. et al. Physical Activity Over the Life Course and Its Association with Cognitive Performance and Impairment in Old Age. *Journal of the American Geriatrics Society*, 2010, vol. 58, iss. 7, pp. 1322–1326. DOI: 10.1111/j.1532-5415.2010.02903.x
34. Scully D., Kremer J., Meade M.M. et al. Physical Exercise and Psychological Wellbeing: a Critical Review. *British Journal of Sports Medicine*, 1998, vol. 32, iss. 2, pp. 111–120. DOI: 10.1136/bjism.32.2.111
35. R. R Development Core Team: A Language and Environment for Statistical Computing; 2015. 2018. DOI: 10.1890/0012-9658(2002)083[3097:CFHIWS]2.0.CO;2
36. Hardmeier M., Hatz F., Bousleiman H. et al. Reproducibility of Functional Connectivity and Graph Measures Based on the Phase Lag Index (PLI) and Weighted Phase Lag Index (wPLI) Derived from High Resolution EEG. *PloS One*, 2014, vol. 9, iss. 10, p. e108648. DOI: 10.1371/journal.pone.0108648
37. Singh M.A. Exercise Comes of Age: Rationale and Recommendations for a Geriatric Exercise Prescription. *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*, 2002, vol. 57, iss. 5, pp. 262–282. DOI: 10.1016/j.cger.2004.03.003
38. Hillman C.H., Pontifex M.B., Raine L.B. et al. The Effect of Acute Treadmill Walking on Cognitive Control and Academic Achievement in Preadolescent Children. *Neuroscience*, 2009, vol. 159, iss. 3, pp. 1044–1054. DOI: 10.1016/j.neuroscience.2009.01.057
39. Biswal B.B., Yetkin F.Z., Haughton V.M. et al. Toward Discovery Science of Human Brain Function. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2010, vol. 107, iss. 10, pp. 4734–4739. DOI: 10.1002/mrm.1910340409

Фекличева Инна Викторовна, заведующий лабораторией молекулярно-генетических исследований здоровья и развития человека, Южно-Уральский государственный университет. 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76. E-mail: feklischevaiv@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4378-1719.

Чипеева Надежда Александровна, научный сотрудник лаборатории молекулярно-генетических исследований здоровья и развития человека, Южно-Уральский государственный университет. 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76. E-mail: nadezda.chipeeva@ya.ru, ORCID: 0000-0003-0845-3138.

Захаров Илья Михайлович, старший научный сотрудник лаборатории возрастной психогенетики, Психологический институт РАО. 125009, г. Москва, ул. Моховая, 9/4. E-mail: iliazaharov@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5096-4313.

Масленникова Екатерина Павловна, младший научный сотрудник лаборатории молекулярно-генетических исследований здоровья и развития человека, Южно-Уральский государственный университет. 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76. E-mail: bayan-sulu@mail.ru, ORCID: 0000-0001-6288-3919.

Исмагуллина Виктория Игоревна, ведущий научный сотрудник лаборатории возрастной психогенетики, Психологический институт РАО. 125009, г. Москва, ул. Моховая 9/4. E-mail: ismatullina.v@pirao.ru, ORCID: 0000-0001-7207-9641.

Поступила в редакцию 19 сентября 2019 г.

DOI: 10.14529/hsm190407

CORRELATION BETWEEN PHYSICAL ACTIVITY AND FUNCTIONAL CONNECTIVITY OF THE BRAIN

I.V. Feklicheva¹, feklischevaiv@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4378-1719,

N.A. Chipeeva¹, nadezda.chipeeva@ya.ru, ORCID: 0000-0003-0845-3138,

I.M. Zakharov², iliazaharov@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5096-4313,

E.P. Maslennikova¹, bayan-sulu@mail.ru, ORCID: 0000-0001-6288-3919,

V.I. Ismatullina², ismatullina.v@pirao.ru, ORCID: 0000-0001-7207-9641

¹South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

²Psychological Institute of the Russian Academy of Education, Moscow, Russian Federation

Aim. The purpose of the article is to study the correlation between physical activity and functional connectivity (FC) of the brain based on EEG data. **Materials and methods.** The study sample included 43 healthy persons aged from 17 to 35 years (26 women). The participants were divided into two groups. The first group (21 persons) was engaged in physical activity for more than 3 hours a week, the second (22 persons) group was not engaged in physical activity. In all participants, 10-minute EEG recording at rest was performed. To assess the differences in the global characteristics of functional connectivity, such graph metrics as the characteristic path length, clustering coefficient, small world index, and modularity were chosen. **Results.** Significant differences between the two groups in terms of the cluster coefficient were obtained using the Wilcoxon test ($W = 201, p < 0.001$). To compare the intergroup differences, the DOT (double one-sided test) procedure was used, which allowed assessing the equivalence of groups based on a pre-selected effect size. When comparing the two groups, statistically significant differences are observed for two one-sided Student's tests, while the effect size exceeds the pre-selected effect size ($d = 0.05$), both for the upper and lower reference values, which indicates not only statistical significance, but also the inequality of the samples. **Conclusion.** Young people who

regularly engage in physical activity for more than 3 hours per week have higher functional connectivity of the brain than those of the same age who do not engage in physical activity, which is expressed in the clustering coefficient. In general, the results of this study show that physical activity increases functional connectivity of the brain in the alpha range. The connectivity increases due to the emergence of new functional clusters within existing associations of brain regions.

Keywords: *physical activity, functional connectivity, electroencephalogram.*

Received 19 September 2019

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Взаимосвязь физической активности и функциональной связанности мозга / И.В. Фекличева, Н.А. Чипеева, И.М. Захаров и др. // Человек. Спорт. Медицина. – 2019. – Т. 19, № 4. – С. 50–59. DOI: 10.14529/hsm190407

FOR CITATION

Feklicheva I.V., Chipeeva N.A., Zakharov I.M., Maslennikova E.P., Ismatullina V.I. Correlation between Physical Activity and Functional Connectivity of the Brain. *Human. Sport. Medicine*, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 50–59. (in Russ.) DOI: 10.14529/hsm190407
