



Обзорная статья
УДК 612.821
DOI: 10.37482/2687-1491-Z196

Нейрофизиологические механизмы двойных задач (обзор)

Екатерина Викторовна Стрельникова* ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-1611-073X>

Маргарита Андреевна Каширина* ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2895-0337>

Анна Олеговна Канцера* ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5513-8627>

*Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии Российской академии наук
(Москва, Россия)

Аннотация. Рассмотрены статьи, посвященные исследованию нейронных механизмов двойных (когнитивно-моторных) задач у здоровых молодых и пожилых людей с помощью методов электроэнцефалографии (ЭЭГ) и функциональной ближней инфракрасной спектроскопии (fNIRS). Представлена библиометрическая карта, отражающая частоту употребления в публикациях ключевых слов (postural balance, gait, walking, neuropsychological tests, attention) и связь между ними, а также демонстрирующая актуальность применения когнитивно-моторной парадигмы как метода изучения нейрофизиологических механизмов двойных задач. Дизайн когнитивно-моторной парадигмы двойной задачи в исследованиях, рассмотренных в данном обзоре, был разнообразным. В качестве когнитивных задач использовались различные счетно-логические, пространственно-образные, аудиальные, вербальные задания, а также модифицированный вариант игры на смартфоне. В качестве двигательных задач – статические (стойка, тандемная стойка) и динамические (стойка на динамической платформе, ходьба на беговой дорожке, ходьба в реальных условиях внешней среды). Рассмотрены особенности пространственного и частотного распределения активации мозга при выполнении различного типа когнитивных и двигательных задач. Продемонстрированы лобно-кортикальные гемодинамические корреляты выполнения двойных задач. Указаны предложенные авторами рассмотренных статей возможные интерпретации результатов исследований. Выводы демонстрируют, что фактический набор задач, используемый в эксперименте, играет важнейшую роль в том, как двойная задача будет обрабатываться. Выполнение двойной задачи требует участия исполнительных функций, координирующих обработку информации в каждой из задач (когнитивной или моторной). Парадигма двойной задачи может быть использована как модель для исследования и оценки исполнительных функций, внимания, рабочей памяти, постурального контроля.

Ключевые слова: двойная задача, многозадачность, когнитивно-моторная парадигма, нейрофизиологические механизмы, электроэнцефалография, функциональная ближняя инфракрасная спектроскопия

Для цитирования: Стрельникова, Е. В. Нейрофизиологические механизмы двойных задач (обзор) / Е. В. Стрельникова, М. А. Каширина, А. О. Канцера // Журнал медико-биологических исследований. – 2024. – Т. 12, № 3. – С. 368-382. – DOI 10.37482/2687-1491-Z196.

© Стрельникова Е. В., Каширина М. А., Канцера А. О., 2024

Ответственный за переписку: Екатерина Викторовна Стрельникова, адрес: 117485, Москва, ул. Бутлерова, д. 5а; e-mail: strelnikovaev@gmail.com

Review article

Neurophysiological Mechanisms of Dual-Tasking (Review)

Ekaterina V. Strel'nikova* ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-1611-073X>

Margarita A. Kashirina* ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2895-0337>

Anna O. Kantserova* ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5513-8627>

*Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology of RAS
(Moscow, Russia)

Abstract. This review considers articles studying neural mechanisms of dual (cognitive-motor) tasks in healthy young and older people using electroencephalography (EEG) and functional near-infrared spectroscopy (fNIRS). A bibliometric network is presented showing the frequency of keywords (*postural balance, gait, walking, neuropsychological tests, attention*) used in publications and the associations between these keywords, as well as demonstrating the relevance of applying the cognitive-motor paradigm as a method for studying the neurophysiological mechanisms of dual-tasking. The design of the cognitive-motor dual-task paradigm used in the works varied greatly. The cognitive tasks included various computational-logical, spatial-figurative, auditory and verbal tasks as well as a modified version of a smartphone game. As motor tasks, static (stand, tandem stand) and dynamic (stand on a dynamic platform, treadmill walking, walking under the actual conditions of outside environment) tasks were used. Spatial and frequency distribution of brain activation when performing various types of cognitive and motor tasks was considered. Frontal cortical haemodynamic correlates of dual-tasking were demonstrated. Possible interpretations of research results proposed by the authors of the articles under study were indicated. The conclusions demonstrate that the actual set of tasks used in the experiment plays an essential role in the way the dual task will be processed. Dual-tasking involves activating executive functions that coordinate information processing in each task (cognitive or motor). The dual-task paradigm can be used as a model to investigate and evaluate executive functions, attention, working memory and postural control.

Keywords: *dual task, multitasking, cognitive-motor paradigm, neurophysiological mechanisms, electroencephalography, functional near-infrared spectroscopy*

For citation: Strel'nikova E.V., Kashirina M.A., Kantserova A.O. Neurophysiological Mechanisms of Dual-Tasking (Review). *Journal of Medical and Biological Research*, 2024, vol. 12, no. 3, pp. 368–382. DOI: 10.37482/2687-1491-Z196

Человеку в повседневной жизни постоянно приходится решать несколько задач одновременно, поэтому многозадачность является важным условием его успешного существования в современном мире. Неудивительно,

что в последнее время вопрос о том, как люди справляются с обилием задач, привлекает все большее внимание исследователей. Термин «многозадачность», согласно литературным источникам, впервые был употреблен в статье

Corresponding author: Ekaterina Strel'nikova, address: ul. Butlerova 5a, Moscow, 117485, Russia; e-mail: strelnikovaev@gmail.com

IBM в 1965 году и означал способность компьютера выполнять несколько различных операций одновременно [1]. В когнитивной психологии понятие «многозадачность» определяется как умение человека в течение одного промежутка времени включиться в разнообразные виды деятельности [2]. Подобная трактовка подразумевает и исследовательскую парадигму двойных задач [3].

Изучение особенностей работы различных структур мозга, их динамического взаимодействия в условиях когнитивной, двигательной и многозадачной деятельности важно для понимания механизмов функционирования нейронных сетей головного мозга, участвующих в различных парадигмах двойных задач (когнитивно-когнитивных, когнитивно-моторных или моторно-моторных) в норме или при патологии. Это необходимо для разработки новых подходов и методов нейрореабилитации. Реабилитация, способствующая адаптации пациентов к условиям информационных нагрузок в социальной среде, включая семью и профессиональную деятельность, имеет огромное значение для общества в целом.

В системе PubMed по запросу dual task за период с 2004 по 2023 год обнаружено 5 378 документов. Примечательно, что почти 50 % работ (2 584 публикаций) датируются 2018–2023 годами. Это говорит о том, что в последние 5 лет проблема изучения процессов, связанных с выполнением двойных задач, стала особенно актуальна. Несмотря на десятилетия исследований, вопросы нейробиологических механизмов двухзадачности все еще обсуждаются, т. к. результаты, полученные в различных экспериментальных условиях с использованием разных методических подходов, трудно сопоставить.

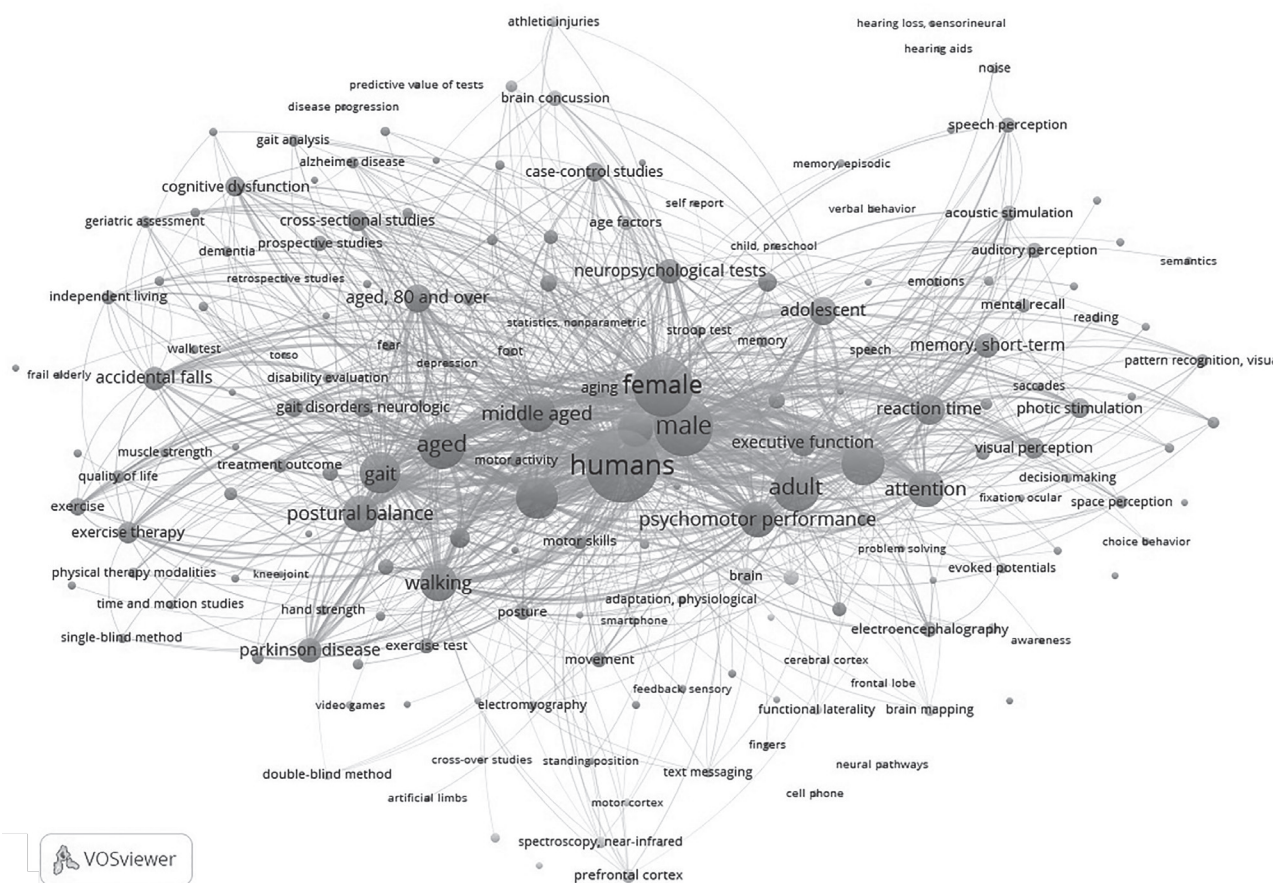
Цель обзора – проанализировать нейронные корреляты выполнения двойных задач на основе когнитивно-моторной парадигмы у взрослых здоровых испытуемых.

Материалы и методы. Исследование включало в себя поиск и интеграцию публикаций, относящихся к теме нейрофизиоло-

гических механизмов выполнения двойных (когнитивно-моторных) задач взрослыми здоровыми испытуемыми, анализ библиометрической информации. Обозревались статьи, где в качестве инструментов нейровизуализации использовались электроэнцефалография (ЭЭГ) и функциональная ближняя инфракрасная спектроскопия (fNIRS). Оба этих метода обеспечивают достоверные и надежные данные при выполнении двойных задач со статическим и динамическим постуральным контролем. Исследования с использованием функциональной магнитно-резонансной томографии (fMRI) и позитронно-эмиссионной томографии (PET) в настоящем обзоре не рассматривались, поскольку данные методы нейровизуализации обычно применяются при выполнении воображаемого движения или имитации ходьбы. Таким образом, критерии включения статей в обзор были следующими: когнитивно-моторная парадигма двойной задачи, инструменты нейровизуализации – ЭЭГ или fNIRS, взрослые здоровые испытуемые.

Отбор статей проводился в электронных базах поисковой системы по биомедицинским исследованиям PubMed, научно-информационной социальной сети ResearchGate, поисковой системы Google Scholar (Google Академия), научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU за 10-летний период – с 2014 по 2023 год. При этом использовались следующие запросы: dual task, balance, EEG, fNIRS, «двойная задача», «ЭЭГ» – и другие связанные поисковые термины.

В качестве дополнительного инструмента анализа библиометрической информации применялась программа VOSviewer. На основе данных, полученных из системы PubMed по запросу dual task за период с 2014 по 2023 год, была создана визуальная карта ключевых слов публикаций. Для построения наукометрической карты использовались только те ключевые слова, которые встречались в выборке не менее 20 раз. В итоговую выборку вошли 183 термина. На библиометрической карте (см. рисунок) ключевые слова формируют кластеры. Ширина линий между кластерами показывает силу свя-



Библиометрическая карта, демонстрирующая частоту использования в публикациях ключевых слов и связь между ними (VOSviewer, метод: co-occurrence). Размер круга отражает частоту встречаемости термина, а расстояние между кругами – меру связи терминов (чем меньше расстояние, тем сильнее связь)

Bibliometric network reflecting the frequency of keywords used in the publications and the associations between these keywords (VOSviewer, method: co-occurrence). The size of a circle reflects the term's frequency, while the distance between the circles shows the measure of association between the terms (the smaller the distance, the stronger the association)

зи между двумя терминами (количество публикаций, в которых два ключевых слова встречаются вместе).

Полученная карта ключевых слов позволяет выделить довольно крупные кластеры *postural balance*, *gait*, *walking*, *neuropsychological tests*, *attention* и отметить значительный уровень связи между этими терминами, что свидетельствует об актуальности использования когнитивно-моторной парадигмы как метода изучения механизмов двойных задач.

Результаты. В обзоре рассмотрены 20 статей, в которых с использованием методов ЭЭГ и fNIRS изучались нейронные корреляты выполнения когнитивно-моторных задач у взрослых здоровых испытуемых.

Нейрофизиологические механизмы выполнения двойных задач по данным ЭЭГ. Задачей исследований Л.А. Жаворонковой и соавт. [4, 5] было сопоставление реактивных перестроек когерентности ЭЭГ при выполнении когнитивных (счетно-логических, простран-

ственно-образных) и двойных (когнитивно-моторных) задач. Авторами статьи [4] показано, что увеличение когерентности диагональных связей между ассоциативными областями мозга (лобными и затылочно-теменными) и снижение уровня когерентности ЭЭГ в локальных парах отведений являются ЭЭГ-показателями успешного выполнения двойных задач испытуемыми. При этом низкое качество выполнения подобных задач характеризуется увеличением уровня когерентности ЭЭГ для значительного числа локальных пар отведений и диапазонов ритмов. Также было выявлено [5] усиление когерентности альфа-, бета- и гамма-ритмов ЭЭГ в центральных, теменных, затылочных отделах правого полушария при выполнении моторной монозадачи взрослыми здоровыми испытуемыми. Реализация пространственно-образных монозадач отличалась усилением когерентности медленных ритмов ЭЭГ в правом полушарии. Авторы полагают, что подобное частотное распределение активации служит нейрофизиологическим механизмом, который обеспечивает одновременное выполнение двух правополушарных задач (зрительно-пространственной и моторной). Выполнение счетно-логических монозадач сопровождалось увеличением когерентности медленных дельта- и тета-ритмов ЭЭГ, в основном в лобно-височных отделах левого полушария. Двойные задачи характеризовались снижением общего количества связей медленных ритмов по сравнению с числом связей при выполнении монозадач. Двойные задачи также сопровождалось увеличением когерентности в диапазоне низкочастотного альфа-ритма в лобных, центральных, теменных отделах и правого, и левого полушарий. Предполагается, что это может говорить об использовании дополнительных ресурсов мозга в условиях парадигмы двухзадачности.

R.A. Ozdemir et al. [6] отслеживали активацию коры во время моно- и двойных задач с целью понять модуляции активности коры, лежащие в основе возрастных различий в условиях когнитивно-моторной задачи. Было обнаружено, что при выполнении двойных

задач у молодых и пожилых людей дельта-активность увеличивается в лобной и центральной областях коры при наличии сложного моторного задания (на раскачивающейся поверхности платформы). Активность тета-ритма в центрально-лобной и центральной коре в обеих группах испытуемых оказалась наиболее чувствительна к производительности рабочей памяти в условиях двойной задачи со сложными когнитивными заданиями. Активация гамма-колебаний в центральной и теменной областях коры наблюдалась только в группе пожилых людей при выполнении двойной задачи со сложным моторным заданием, что, возможно, говорит об увеличении распределения источников внимания при выполнении постуральных задач.

H. Bohle et al. [7] изучали поведенческие и нейронные корреляты когнитивно-моторных помех в условиях многозадачности у молодых и пожилых людей. В исследовании было показано, что активность в дельта- и тета-диапазонах чувствительна к сложности задачи, что согласуется с данными R.A. Ozdemir et al. [6]. Независимо от возраста испытуемых максимальная дельта- и тета-активность наблюдалась при выполнении тройной задачи (когнитивно-когнитивно-моторной). Наиболее яркие различия, связанные с возрастом испытуемых и типом задач, обнаружены для альфа-диапазона. Только у молодых людей наблюдалось альфа-подавление при выполнении сложной тройной задачи по сравнению с реализацией условий двойной задачи. Эти результаты согласуются с данными R. Beurskens et al. [8], которые показали снижение частоты альфа-ритма у молодых испытуемых во время выполнения двойной задачи по сравнению с однозадачной ходьбой. Указанные авторы отмечают, что изменения в альфа-диапазоне при решении сложных задач могут отражать привлечение дополнительных нейронных ресурсов у молодых и ограниченный нейронный адаптивный потенциал у пожилых людей.

Исследование M. Rubega et al. [9] было направлено на установление корковых корре-

лятов во время статических и динамических тестов равновесия у молодых и пожилых испытуемых. Различные стратегии активации коры головного мозга наиболее ярко проявились при выполнении двойных задач, хотя обнаружены уже в тестах на статическое равновесие. Пожилые люди показали высокую мощность в дельта-диапазоне в лобных областях, что, вероятно, связано с механизмами поддержания постурального контроля [6]. При добавлении визуальной задачи они демонстрировали увеличение тета-активации над сенсомоторной и затылочной корой. Для пожилых людей была предпочтительна стратегия постурального контроля. Молодым участникам исследования в тестах с двумя задачами была свойственна активация лобной и затылочной областей в бета- и гамма-диапазонах. Аналогичная активация (в бета- и гамма-диапазонах) в затылочной области наблюдалась и во время спокойного стояния у молодых людей. Вероятно, данные процессы свидетельствуют о том, что в популяции молодых людей визуальные сигналы обрабатываются более эффективно.

Основная цель исследований M. Kahya et al. [10, 11] состояла в изучении влияния увеличения сложности постуральной задачи на показатели ЭЭГ. У молодых людей [10] мощность альфа-ритма в затылочной области была выше при выполнении двойной задачи с закрытыми глазами, что связано с усилением обработки сенсорной информации при сохранении равновесия в условиях зрительной окклюзии [12, 13]. Соотношение тета-/бета-мощности в лобных и сенсомоторных областях коры было чувствительно к двойной задаче и увеличивалось при возрастании сложности постуральной задачи. Как было показано в других исследованиях, сила тета-ритма, связанная с вниманием и исполнительской функцией, коррелирует с трудностью двигательных задач [14–16]. Подавление бета-активности наблюдается во время контроля походки и выполнении сложных задач на равновесие [17]. Возможно, повышенная тета- и сниженная бета-мощность участвуют в активном постуральном контроле

и могут изменяться при варьировании сложности задачи. При выполнении двойных задач пожилые люди в [11] продемонстрировали снижение мощности альфа-ритма в центральных областях обоих полушарий и увеличение соотношения тета-/бета-мощности во всех областях. Снижение мощности альфа-ритма может быть связано с уменьшением моторного торможения [18], что, в свою очередь, прогнозирует ухудшение баланса у пожилых людей [19]. Степень изменения отношения тета-/бета-ритмов в передних отделах коры у пожилых людей коррелировала с показателями постурального колебания и с большей стоимостью выполнения двойных задач. Соотношение тета-/бета-мощности исследователи также связывают с производительностью в задачах, требующих исполнительской функции и контроля внимания [20, 21].

Разработки в области мобильных технологий визуализации мозга и тела (MoBI) позволили изучать локомоцию человека в реальных условиях внешней среды.

В работе S. Pizzamiglio et al. [22] MoBI была использована для анализа нейрофизиологических аспектов трех состояний ходьбы у молодых людей: ходьба, ходьба во время разговора и ходьба во время отправки текстовых сообщений. Ходьба во время разговора соответствовала максимальной мощности тета-ритма в левой лобно-височной области, что может быть связано с повышенной активностью в области Брока. Другая область активации, выявленная во время ходьбы с разговором, – правая теменно-затылочная кора – показала высокую тета- и бета-мощность. Ходьба во время отправки текстовых сообщений была связана со снижением мощности бета-ритма в лобно-премоторной и сенсомоторной областях коры по сравнению с ходьбой во время разговора. Согласно исследованиям других авторов, высокий уровень десинхронизации бета-ритма при выполнении сложных двигательных или второстепенных задач может быть основой для сенсомоторной интеграции, поддержания производительности и контроля ошибок [8, 23].

Нейрофизиологические механизмы выполнения двойных задач по данным fNIRS. R. Beurskens et al. [24], используя метод fNIRS, исследовали лобно-кортикальные гемодинамические корреляты ходьбы в условиях двухзадачности у молодых и пожилых людей. У первых переход от однозадачной к двухзадачной ходьбе выявил небольшое изменение префронтальной активации, у вторых префронтальная активация существенно снижалась во время двойной ходьбы со сложной зрительной задачей. Авторы интерпретируют эти результаты как свидетельство смещения ресурсов обработки информации из префронтальной коры в другие области мозга, когда пожилые люди сталкиваются с ситуацией ходьбы и одновременного выполнения сложной зрительной задачи. Возможно, исполнительная система мозга трудно координировать две зрительные задачи – навигацию в пространстве и визуальную задачу. Возрастное снижение уровней активации в префронтальных областях мозга при увеличении когнитивной нагрузки было показано и в исследованиях других авторов [25]. Подобное явление хорошо согласуется с моделью CRUNCH (гипотеза использования нейронных цепей, связанная с компенсацией) [26]. Согласно ей, пожилые люди могут использовать иной набор мозговых сетей, чем молодые. Когда основная сеть не может поддерживать производительность, необходимую для выполнения задачи, дополнительно привлекаются новые сети, не используемые молодыми людьми. Эти вторичные сети могут быть не так эффективны, как первичная, что влечет за собой снижение производительности.

A. Mirelman et al. [27, 28] в своих исследованиях использовали технологию fNIRS для изучения активности префронтальной коры в сложных условиях ходьбы (выполнение двух задач и преодоление препятствий) у молодых и пожилых людей. Результаты выявили, что вторые обнаруживают повышение уровня оксигенации в префронтальной коре уже при обычной ходьбе по сравнению с исходным спокойным стоянием, в то время как у первых та-

кой закономерности не прослеживается. Данное наблюдение подтверждает идею о том, что с возрастом ходьба становится менее автоматизированной и требует опоры на когнитивные резервы префронтальной коры. По мере того как в условиях двойной задачи задания усложнялись, обе группы показали повышение активации префронтальной коры, при еще более высокой активации в группе пожилых людей. Выводы авторов согласуются с теориями старения, которые постулируют, что с возрастом активность мозга становится более выраженной при увеличении требований к задачам [29]. В данном исследовании, повышенная активация префронтальной коры у пожилых людей, возможно, обеспечила адекватную производительность как в условиях двойной задачи, так и при ходьбе с препятствиями.

M.-I.B. Lin et al. [30] использовали fNIRS и систему 3D-анализа движений для изучения нейронных коррелятов ходьбы при выполнении двойных задач молодыми людьми. Относительные изменения уровней активации правой префронтальной области коры значительно различались в зависимости от сложности задачи и условий ходьбы. Уровень активации правой префронтальной коры у молодых людей во время выполнения двойной задачи был ниже, чем при обычной ходьбе. Ходьба по узкой дорожке вызывала меньшее снижение уровня активации по сравнению с ходьбой по широкой дороге и ходьбой с препятствиями. Авторы отмечают, что, хотя основные причины наблюдаемого снижения активации правой префронтальной коры трудно определить, частично это может быть объяснено нейронной пластичностью и связано со стратегиями когнитивных сетей, которые используются в двойной задаче [31].

Цель исследования N. Takeuchi et al. [32] состояла в том, чтобы выяснить, в какой степени активность префронтальной коры отражает когнитивные и физические потребности при использовании смартфона во время ходьбы. Результаты показали, что степень активации префронтальной коры при данной задаче не от-

личалась у молодых и пожилых людей. Однако у первых активация левой префронтальной коры снижала затраты на выполнение двойной задачи (оценка по частоте ошибочных ответов), а активация правой префронтальной коры, напротив, увеличивала их (оценка по величине ускорения ходьбы). Предполагается, что активность левой префронтальной коры ингибирует неадекватное действие, а активность правой префронтальной коры обеспечивает стабильность походки. У пожилых людей активация префронтальной коры подавляла ухудшение походки, что сопровождалось ухудшением качества выполнения когнитивной задачи. При этом у них наблюдался менее латерализованный паттерн активности префронтальной коры. В качестве теории нейронной компенсации снижения когнитивной функции во время старения обычно предлагается модель HAROLD (уменьшение асимметрии полушарий у пожилых людей) [33]. Данная модель предполагает, что для решения когнитивной задачи полушария должны работать вместе, поскольку с возрастом уменьшается способность нейронов к обработке информации в каждом полушарии. В рассматриваемом исследовании у пожилых людей затраты на выполнение двойной задачи коррелировали с активацией левой и средней префронтальной коры, но не с активацией правой префронтальной коры. Данные паттерны не являются типичными для модели HAROLD, но тем не менее согласуются с этой концепцией. Как указывают авторы, при использовании смартфона во время ходьбы пожилым людям может потребоваться более обширная активация префронтальной коры.

A.L. Rosso et al. [34] использовали методику fNIRS для изучения процесса выполнения двойной задачи с динамическим контролем осанки. Было обнаружено, что у пожилых людей в условиях одно- и двухзадачности активация мозга выше, чем у молодых людей, при одинаковом качестве выполнения заданий. Активация мозга во время постуральной задачи была локализована в дорсолатеральной префронтальной коре и верхней височной/супра-

маргинальной извилине. Эти области связаны с вторичной соматосенсорной сетью, а их активация отмечена также в исследованиях вестибулярной функции и равновесия [35, 36]. При выполнении задачи на внимание активация наблюдалась только в области дорсолатеральной префронтальной коры. Согласно работе других авторов, она участвует в координации одновременной и интерферирующей обработки задач [37]. И хотя исследование A.L. Rosso et al. [34] было ограничено небольшим размером выборки и регистрировало активность мозга только в левом полушарии, результаты показали, что в условиях двойной задачи у пожилых людей нейронные ресурсы, необходимые для постурального контроля, уменьшаются, и это приводит к увеличению раскачивания тела.

M. Chen et al. [38] обнаружили, что у пожилых людей уровни оксигенации в префронтальной коре значительно выше в условиях ходьбы во время разговора по сравнению с обычной ходьбой, независимо от наличия или отсутствия препятствия. У людей с медленной походкой оксигенация префронтальной коры была выше и при обычной ходьбе с препятствиями, и при двухзадачной ходьбе с препятствиями. В целом препятствия требовали большего вовлечения префронтальной коры у лиц с ограничениями подвижности. Аналогичные результаты получены и в работе Y. Chen et al. [39]: по мере увеличения трудностей при ходьбе активация префронтальной коры у пожилых людей изменялась с правосторонней на двустороннюю. Выводы данных исследований также соответствуют закономерности модели HAROLD [33] – с возрастом латерализация активации префронтальной коры имеет тенденцию к уменьшению. Согласуются они и с более общей моделью CRUNCH [26], поскольку описанные паттерны могут быть отражением возрастных компенсаторных процессов.

Основная цель исследования Y. Chen et al. [40] состояла в том, чтобы, используя парадигму двойных задач, изучить взаимодействие между постуральным контролем и задачей пространственной/непространственной рабо-

чей памяти у молодых людей. Такие задачи активировали среднюю лобную извилину в дорсолатеральной префронтальной коре. Задача непространственной рабочей памяти активировала еще и нижнюю лобную извилину в вентролатеральной префронтальной коре. Подобное распределение активации мозга во время выполнения задач на рабочую память согласуется с исследованиями других авторов [41, 42]. Также Y. Chen et al. [40] обнаружили, что задача пространственной рабочей памяти связана с активацией теменных областей. Показано, что теменная доля участвует в мониторинге позы и движения тела [43]. Анализ данных fNIRS позволил убедиться, что постуральный контроль имел избирательное взаимодействие с задачей пространственной рабочей памяти. Выполнение двойной задачи (постуральный контроль / задача пространственной рабочей памяти) приводило к снижению активации лобно-теменной области левого полушария.

U. Marusic et al. [44] использовали постурально-когнитивную парадигму двойной задачи для изучения влияния процессов старения на оксигенацию префронтальной коры. В двух возрастных группах (молодые и пожилые) обнаружено значительное увеличение уровня оксигенации в дорсолатеральной префронтальной коре с возрастанием сложности постуральной задачи (нормальное положение ног / тандемное положение ног). При добавлении когнитивной нагрузки в обеих возрастных группах никаких изменений в уровне оксигенации выявлено не было. Таким образом, в исследовании показано, что именно увеличение постуральных, а не когнитивных, требований способствует усилению активности дорсолатеральной префронтальной коры.

R.J. St. George et al. [45] изучали активность префронтальной коры у молодых и пожилых людей во время выполнения сложных одиночных задач на равновесие и задач на равновесие совместно с когнитивной задачей. У первой группы испытуемых левосторонняя латерализация активности префронтальной коры в самых сложных условиях баланса становилась

более двусторонней, имитируя билатеральную активность префронтальной коры, которая наблюдалась у второй группы. У пожилых людей нейронная активность префронтальной коры увеличивалась при возрастании трудности баланса, а затем, в более сложных условиях двойной задачи, начинала падать. В данном исследовании внутригрупповые корреляции не показали связи повышенной активности префронтальной коры с улучшением баланса. Авторы отмечают, что, возможно, активная роль префронтальной коры в сохранении равновесия не является статической, а регулируется за счет нисходящих и восходящих влияний в односторонней или двусторонней коре для компенсации нестабильности баланса.

M. Saraiva et al. [46] исследовали активность префронтальной коры и мышечную активность при выполнении двойной задачи молодыми людьми. Выводы работы показали, что активность префронтальной коры увеличивалась. При этом когнитивная задача отрицательно влияла на двигательную производительность. Кроме того, молодые люди отдавали приоритет когнитивным функциям, а не движению. Во время выполнения двойной задачи наблюдались улучшение производительности когнитивных задач и снижение производительности двигательных задач, что, по словам авторов, свидетельствует о компромиссе когнитивного приоритета [47].

Проведенный анализ статей показал, что фактический набор задач играет важную роль в том, как двойная задача обрабатывается. Выполнение подобной задачи требует участия исполнительных функций, которые, помимо прочих процессов, координируют обработку информации во время реализации каждой из задач. Исполнительные функции охватывают ряд когнитивных процессов [48], среди которых предвосхищение, выбор целей, планирование, самоконтроль, саморегуляция, использование обратной связи. В настоящее время нет единой теории, которая позволяет объяснить координацию и контроль когнитивных процессов во время сложных действий.

Парадигма двойной задачи может быть адекватной моделью оценки исполнительных функций, необходимых для одновременного выполнения нескольких задач, скорости обработки информации, внимания, рабочей памяти, постурального контроля. Дальнейшие

нейрофизиологические исследования с использованием данной методики могут помочь охарактеризовать работу различных сетей мозга, а также объяснить особенности процессов интеграции связей мозга в контексте многозадачности.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Вклад авторов: Стрельникова Е.В. – создание концепции обзора, поиск литературы, обзор публикаций по теме статьи, создание библиометрической карты, написание текста рукописи, редактирование; Каширина М.А. – поиск литературы, обзор публикаций, редактирование текста статьи; Канцерова А.О. – поиск литературы, обзор публикаций, редактирование текста статьи.

Authors' contributions: E.V. Strel'nikova developed the concept of the review, undertook literature search, reviewed relevant publications, created the bibliometric network as well as prepared and edited the manuscript; M.A. Kashirina undertook literature search, reviewed relevant publications and edited the article; A.O. Kantserova undertook literature search, reviewed relevant publications and edited the article.

Список литературы

1. IBM Operating System/360: Concepts and Facilities. N. Y.: IBM Systems Reference Library, 1965. 93 p.
2. Koch I., Poljac E., Müller H., Kiesel A. Cognitive Structure, Flexibility, and Plasticity in Human Multitasking – an Integrative Review of Dual-Task and Task-Switching Research // Psychol. Bull. 2018. Vol. 144, № 6. P. 557–583. <https://doi.org/10.1037/bul0000144>
3. Pashler H. Task Switching and Multitask Performance // Control of Cognitive Processes: Attention and Performance XVIII / ed. by S. Monsell, J. Driver. London: The MIT Press, 2000. P. 277–307.
4. Жаворонкова Л.А., Кушнир Е.М., Жарикова А.В., Купцова С.В., Шевцова Т.П., Куликов М.А., Воронов В.Г. Электроэнцефалографические характеристики здоровых людей с разной успешностью выполнения двойных задач (позный контроль и счет) // Журн. высш. нерв. деятельности им. И.В. Павлова. 2015. Т. 65, № 5. С. 597–606. <https://doi.org/10.7868/S0044467715050160>
5. Жаворонкова Л.А., Шевцова Т.П., Морареску С.И., Позднеев А.В., Купцова С.В. Интракортикальные связи при выполнении двойных задач – моторных и счетно-логических или пространственно-образных // Физиология человека. 2019. Т. 45, № 2. С. 16–28. <https://doi.org/10.1134/S0131164619020139>
6. Ozdemir R.A., Contreras-Vidal J.L., Lee B.-C., Paloski W.H. Cortical Activity Modulations Underlying Age-Related Performance Differences During Posture-Cognition Dual Tasking // Exp. Brain Res. 2016. Vol. 234, № 11. P. 3321–3334. <https://doi.org/10.1007/s00221-016-4730-5>
7. Bohle H., Rimpel J., Schauenburg G., Gebel A., Stelzel C., Heinzl S., Rapp M., Granacher U. Behavioral and Neural Correlates of Cognitive-Motor Interference During Multitasking in Young and Old Adults // Neural Plast. 2019. Vol. 2019. Art. № 9478656. <https://doi.org/10.1155/2019/9478656>
8. Beurskens R., Steinberg F., Antoniewicz F., Wolff W., Granacher U. Neural Correlates of Dual-Task Walking: Effects of Cognitive versus Motor Interference in Young Adults // Neural Plast. 2016. Vol. 2016. Art. № 8032180. <https://doi.org/10.1155/2016/8032180>
9. Rubega M., Formaggio E., Di Marco R., Bertuccelli M., Tortora S., Menegatti E., Cattelan M., Bonato P., Masiero S., Del Felice A. Cortical Correlates in Upright Dynamic and Static Balance in the Elderly // Sci. Rep. 2021. Vol. 11, № 1. Art. № 14132. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93556-3>
10. Kahya M., Liao K., Gustafson K.M., Akinwuntan A.E., Manor B., Devos H. Cortical Correlates of Increased Postural Task Difficulty in Young Adults: A Combined Pupillometry and EEG Study // Sensors (Basel). 2022. Vol. 22, № 15. Art. № 5594. <https://doi.org/10.3390/s22155594>

11. Kahya M., Gouskova N.A., Lo O.-Y., Zhou J., Cappon D., Finnerty E., Pascual-Leone A., Lipsitz L.A., Hausdorff J.M., Manor B. Brain Activity During Dual-Task Standing in Older Adults // *J. Neuroeng. Rehabil.* 2022. Vol. 19, № 1. Art. № 123. <https://doi.org/10.1186/s12984-022-01095-3>
12. Babiloni C., Del Percio C., Arendt-Nielsen L., Soricell A., Romani G.L., Rossini P.M., Capotosto P. Cortical EEG Alpha Rhythms Reflect Task-Specific Somatosensory and Motor Interactions in Humans // *Clin. Neurophysiol.* 2014. Vol. 125, № 10. P. 1936–1945. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2014.04.021>
13. Başar E. A Review of Alpha Activity in Integrative Brain Function: Fundamental Physiology, Sensory Coding, Cognition and Pathology // *Int. J. Psychophysiol.* 2012. Vol. 86, № 1. P. 1–24. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2012.07.002>
14. Shaw E.P., Rietschel J.C., Hendershot B.D., Pruziner A.L., Miller M.W., Hatfield B.D., Gentili R.J. Measurement of Attentional Reserve and Mental Effort for Cognitive Workload Assessment Under Various Task Demands During Dual-Task Walking // *Biol. Psychol.* 2018. Vol. 134. P. 39–51. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2018.01.009>
15. Dominguez M.C., O’Keefe C., O’Rourke E., Feerick N., Reilly R.B. Cortical Theta Activity and Postural Control in Non-Visual and High Cognitive Load Tasks: Impact for Clinical Studies // 2019 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC). Berlin, 2019. P. 1539–1542. <https://doi.org/10.1109/embc.2019.8857663>
16. Kenny R.P.W., Eaves D.L., Martin D., Behmer L.P., Dixon J. The Effects of Textured Insoles on Cortical Activity and Quiet Bipedal Standing with and Without Vision: An EEG Study // *J. Mot. Behav.* 2020. Vol. 52, № 4. P. 489–501. <https://doi.org/10.1080/00222895.2019.1648237>
17. Peterson S.M., Ferris D.P. Differentiation in Theta and Beta Electrocortical Activity Between Visual and Physical Perturbations to Walking and Standing Balance // *eNeuro.* 2018. Vol. 5, № 4. Art. № ENEURO.0207-18.2018. <https://doi.org/10.1523/eneuro.0207-18.2018>
18. Nguyen T.V., Balachandran P., Muggleton N.G., Liang W.-K., Juan C.-H. Dynamical EEG Indices of Progressive Motor Inhibition and Error-Monitoring // *Brain Sci.* 2021. Vol. 11, № 4. Art. № 478. <https://doi.org/10.3390/brainsci11040478>
19. Corp D.T., Youssef G.J., Clark R.A., Gomes-Osman J., Yücel M.A., Oldham S.J., Aldraiwiesh S., Rice J., Pascual-Leone A., Rogers M.A. Reduced Motor Cortex Inhibition and a ‘Cognitive-First’ Prioritisation Strategy for Older Adults During Dual-Tasking // *Exp. Gerontol.* 2018. Vol. 113. P. 95–105. <https://doi.org/10.1016/j.exger.2018.09.018>
20. Putman P., Verkuil B., Arias-Garcia E., Pantazi I., van Schie C. EEG Theta/Beta Ratio as a Potential Biomarker for Attentional Control and Resilience Against Deleterious Effects of Stress on Attention // *Cogn. Affect. Behav. Neurosci.* 2014. Vol. 14, № 2. P. 782–791. <https://doi.org/10.3758/s13415-013-0238-7>
21. Angelidis A., van der Does W., Schakel L., Putman P. Frontal EEG Theta/Beta Ratio as an Electrophysiological Marker for Attentional Control and Its Test-Retest Reliability // *Biol. Psychol.* 2016. Vol. 121. Pt. A. P. 49–52. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2016.09.008>
22. Pizzamiglio S., Naeem U., Abdalla H., Turner D.L. Neural Correlates of Single- and Dual-Task Walking in the Real World // *Front. Hum. Neurosci.* 2017. Vol. 11. Art. № 460. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2017.00460>
23. Bulea T.C., Kim J., Damiano D.L., Stanley C.J., Park H.-S. Prefrontal, Posterior Parietal and Sensorimotor Network Activity Underlying Speed Control During Walking // *Front. Hum. Neurosci.* 2015. Vol. 9. Art. № 247. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00247>
24. Beurskens R., Helmich I., Rein R., Bock O. Age-Related Changes in Prefrontal Activity During Walking in Dual-Task Situations: A fNIRS Study // *Int. J. Psychophysiol.* 2014. Vol. 92, № 3. P. 122–128. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2014.03.005>
25. Hazlett E.A., Buchsbaum M.S., Mohs R.C., Spiegel-Cohen J., Wei T.-C., Azueta R., Haznedar M.M., Singer M.B., Shihabuddin L., Luu-Hsia C., Harvey P.D. Age-Related Shift in Brain Region Activity During Successful Memory Performance // *Neurobiol. Aging.* 1998. Vol. 19, № 5. P. 437–445. [https://doi.org/10.1016/s0197-4580\(98\)00075-x](https://doi.org/10.1016/s0197-4580(98)00075-x)
26. Reuter-Lorenz P.A., Cappell K.A. Neurocognitive Aging and the Compensation Hypothesis // *Curr. Dir. Psychol. Sci.* 2008. Vol. 17, № 3. P. 177–182. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1467-8721.2008.00570.x>
27. Mirelman A., Maidan I., Bernad-Elazari H., Nieuwhof F., Reelick M., Giladi N., Hausdorff J.M. Increased Frontal Brain Activation During Walking While Dual Tasking: An fNIRS Study in Healthy Young Adults // *J. Neuroeng. Rehabil.* 2014. Vol. 11, № 1. Art. № 85. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-11-85>

28. Mirelman A., Maidan I., Bernad-Elazari H., Shustack S., Giladi N., Hausdorff J.M. Effects of Aging on Prefrontal Brain Activation During Challenging Walking Conditions // *Brain Cogn.* 2017. Vol. 115. P. 41–46. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2017.04.002>
29. Steffener J., Stern Y. Exploring the Neural Basis of Cognitive Reserve in Aging // *Biochim. Biophys. Acta.* 2012. Vol. 1822, № 3. P. 467–473. <https://doi.org/10.1016/j.bbadis.2011.09.012>
30. Lin M.-I.B., Lin K.-H. Walking While Performing Working Memory Tasks Changes the Prefrontal Cortex Hemodynamic Activations and Gait Kinematics // *Front. Behav. Neurosci.* 2016. Vol. 10. Art. № 92. <https://doi.org/10.3389/fnbeh.2016.00092>
31. Barulli D., Stern Y. Efficiency, Capacity, Compensation, Maintenance, Plasticity: Emerging Concepts in Cognitive Reserve // *Trends Cogn. Sci.* 2013. Vol. 17, № 10. P. 502–509. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2013.08.012>
32. Takeuchi N., Mori T., Suzukamo Y., Tanaka N., Izumi S.-I. Parallel Processing of Cognitive and Physical Demands in Left and Right Prefrontal Cortices During Smartphone Use While Walking // *BMC Neurosci.* 2016. Vol. 17. Art. № 9. <https://doi.org/10.1186/s12868-016-0244-0>
33. Cabeza R. Hemispheric Asymmetry Reduction in Older Adults: The HAROLD Model // *Psychol. Aging.* 2002. Vol. 17, № 1. P. 85–100. <https://doi.org/10.1037//0882-7974.17.1.85>
34. Rosso A.L., Cenciarini M., Sparto P.J., Loughlin P.J., Furman J.M., Huppert T.J. Neuroimaging of An Attention Demanding Dual-Task During Dynamic Postural Control // *Gait Posture.* 2017. Vol. 57. P. 193–198. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2017.06.013>
35. Karim H.T., Fuhrman S.I., Furman J.M., Huppert T.J. Neuroimaging to Detect Cortical Projection of Vestibular Response to Caloric Stimulation in Young and Older Adults Using Functional Near-Infrared Spectroscopy (fNIRS) // *Neuroimage.* 2013. Vol. 76. P. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.02.061>
36. Karim H., Schmidt B., Dart D., Beluk N., Huppert T. Functional Near-Infrared Spectroscopy (fNIRS) of Brain Function During Active Balancing Using a Video Game System // *Gait Posture.* 2012. Vol. 35, № 3. P. 367–372. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2011.10.007>
37. Szameitat A.J., Schubert T., Müller K., von Cramon D.Y. Localization of Executive Functions in Dual-Task Performance with fMRI // *J. Cogn. Neurosci.* 2002. Vol. 14, № 8. P. 1184–1199. <https://doi.org/10.1162/089892902760807195>
38. Chen M., Pillemer S., England S., Izzetoglu M., Mahoney J.R., Holtzer R. Neural Correlates of Obstacle Negotiation in Older Adults: An fNIRS Study // *Gait Posture.* 2017. Vol. 58. P. 130–135. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2017.07.043>
39. Chen Y., Cao Z., Mao M., Sun W., Song Q., Mao D. Increased Cortical Activation and Enhanced Functional Connectivity in the Prefrontal Cortex Ensure Dynamic Postural Balance During Dual-Task Obstacle Negotiation in the Older Adults: A fNIRS Study // *Brain Cogn.* 2022. Vol. 163. Art. № 105904. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2022.105904>
40. Chen Y., Yu Y., Niu R., Liu Y. Selective Effects of Postural Control on Spatial vs. Nonspatial Working Memory: A Functional Near-Infrared Spectral Imaging Study // *Front. Hum. Neurosci.* 2018. Vol. 12. Art. № 243. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2018.00243>
41. Sala-Llonch R., Palacios E.M., Junqué C., Bargalló N., Vendrell P. Functional Networks and Structural Connectivity of Visuospatial and Visuo-perceptual Working Memory // *Front. Hum. Neurosci.* 2015. Vol. 9. Art. № 340. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00340>
42. de Souza Custódio J.C., Martins C.W., Lugon M.D., Fregni F., Nakamura-Palacios E.M. Epidural Direct Current Stimulation over the Left Medial Prefrontal Cortex Facilitates Spatial Working Memory Performance in Rats // *Brain Stimul.* 2013. Vol. 6, № 3. P. 261–269. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2012.07.004>
43. Dary Z., Lenggenhager B., Lagarde S., Medina Villalon S., Bartolomei F., Lopez C. Neural Bases of the Bodily Self as Revealed by Electrical Brain Stimulation: A Systematic Review // *Hum. Brain Mapp.* 2023. Vol. 44, № 7. P. 2936–2959. <https://doi.org/10.1002/hbm.26253>
44. Marusic U., Taube W., Morrison S.A., Biasutti L., Grassi B., De Pauw K., Meeusen R., Pisot R., Ruffieux J. Aging Effects on Prefrontal Cortex Oxygenation in a Posture-Cognition Dual-Task: An fNIRS Pilot Study // *Eur. Rev. Aging Phys. Act.* 2019. Vol. 16. Art. № 2. <https://doi.org/10.1186/s11556-018-0209-7>
45. St. George R.J., Hinder M.R., Puri R., Walker E., Callisaya M.L. Functional Near-Infrared Spectroscopy Reveals the Compensatory Potential of Pre-Frontal Cortical Activity for Standing Balance in Young and Older Adults // *Neuroscience.* 2021. Vol. 452. P. 208–218. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2020.10.027>

46. Saraiva M., Castro M.A., Vilas-Boas J.P. Muscular and Prefrontal Cortex Activity During Dual-Task Performing in Young Adults // Eur. J. Investig. Health Psychol. Educ. 2023. Vol. 13, № 4. P. 736–747. <https://doi.org/10.3390/ejihpe13040055>

47. Bayot M., Dujardin K., Tard C., Defebvre L., Bonnet C.T., Allart E., Delval A. The Interaction Between Cognition and Motor Control: A Theoretical Framework for Dual-Task Interference Effects on Posture, Gait Initiation, Gait and Turning // Neurophysiol. Clin. 2018. Vol. 48, № 6. P. 361–375. <https://doi.org/10.1016/j.neucli.2018.10.003>

48. Tirapu-Ustárrroz J., García-Molina A., Luna-Lario P., Roig-Rovira T., Pelegrin-Valero P. Modelos de funciones y control ejecutivo (I) // Rev. Neurol. 2008. Vol. 46, № 11. P. 684–692. <http://dx.doi.org/10.33588/rn.4611.2008119>

References

1. IBM Operating System/360: Concepts and Facilities. *IBM Systems Reference Library*. New York, 1965. 93 p.
2. Koch I., Poljac E., Müller H., Kiesel A. Cognitive Structure, Flexibility, and Plasticity in Human Multitasking – an Integrative Review of Dual-Task and Task-Switching Research. *Psychol. Bull.*, 2018, vol. 144, no. 6, pp. 557–583. <https://doi.org/10.1037/bul0000144>
3. Pashler H. Task Switching and Multitask Performance. Monsell S., Driver J. (eds.). *Control of Cognitive Processes: Attention and Performance XVIII*. London, 2000, pp. 277–307.
4. Zhavoronkova L.A., Kushnir E.M., Zharikova A.V., Kuptsova S.V., Shevtsova T.P., Kulikov M.A., Voronov V.G. Elektroentsefalograficheskie kharakteristiki zdorovykh lyudey s raznoy uspešnost'yu vypolneniya dvoynykh zadach (poznyy kontrol' i schet) [Electroencephalographic Parameters of Healthy Persons with Different Successfulness of Dual-Task Performance (Postural Control and Calculation)]. *Zhurnal vysshey nervnoy deyatel'nosti im. I.V. Pavlova*, 2015, vol. 65, no. 5, pp. 597–606. <https://doi.org/10.7868/S0044467715050160>
5. Zhavoronkova L.A., Pozdnev A.V., Kuptsova S.V., Shevtsova T.P., Moraresku S.I. Intracortical Connections in Dual Tasks Including Motor and Computing–Logical or Spatial–Visual Components. *Hum. Physiol.*, 2019, vol. 45, no. 2, pp. 126–136. <https://doi.org/10.1134/S0362119719020130>
6. Ozdemir R.A., Contreras-Vidal J.L., Lee B.-C., Paloski W.H. Cortical Activity Modulations Underlying Age-Related Performance Differences During Posture-Cognition Dual Tasking. *Exp. Brain Res.*, 2016, vol. 234, no. 11, pp. 3321–3334. <https://doi.org/10.1007/s00221-016-4730-5>
7. Bohle H., Rimpel J., Schauenburg G., Gebel A., Stelzel C., Heinzel S., Rapp M., Granacher U. Behavioral and Neural Correlates of Cognitive-Motor Interference During Multitasking in Young and Old Adults. *Neural Plast.*, 2019, vol. 2019. Art. no. 9478656. <https://doi.org/10.1155/2019/9478656>
8. Beurskens R., Steinberg F., Antoniewicz F., Wolff W., Granacher U. Neural Correlates of Dual-Task Walking: Effects of Cognitive versus Motor Interference in Young Adults. *Neural Plast.*, 2016, vol. 2016. Art. no. 8032180. <https://doi.org/10.1155/2016/8032180>
9. Rubega M., Formaggio E., Di Marco R., Bertuccelli M., Tortora S., Menegatti E., Cattelan M., Bonato P., Masiero S., Del Felice A. Cortical Correlates in Upright Dynamic and Static Balance in the Elderly. *Sci. Rep.*, 2021, vol. 11, no. 1. Art. no. 14132. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93556-3>
10. Kahya M., Liao K., Gustafson K.M., Akinwuntan A.E., Manor B., Devos H. Cortical Correlates of Increased Postural Task Difficulty in Young Adults: A Combined Pupillometry and EEG Study. *Sensors (Basel)*, 2022, vol. 22, no. 15. Art. no. 5594. <https://doi.org/10.3390/s22155594>
11. Kahya M., Gouskova N.A., Lo O.-Y., Zhou J., Cappon D., Finnerty E., Pascual-Leone A., Lipsitz L.A., Hausdorff J.M., Manor B. Brain Activity During Dual-Task Standing in Older Adults. *J. Neuroeng. Rehabil.*, 2022, vol. 19, no. 1. Art. no. 123. <https://doi.org/10.1186/s12984-022-01095-3>
12. Babiloni C., Del Percio C., Arendt-Nielsen L., Soricell A., Romani G.L., Rossini P.M., Capotosto P. Cortical EEG Alpha Rhythms Reflect Task-Specific Somatosensory and Motor Interactions in Humans. *Clin. Neurophysiol.*, 2014, vol. 125, no. 10, pp. 1936–1945. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2014.04.021>
13. Başar E. A Review of Alpha Activity in Integrative Brain Function: Fundamental Physiology, Sensory Coding, Cognition and Pathology. *Int. J. Psychophysiol.*, 2012, vol. 86, no. 1, pp. 1–24. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2012.07.002>
14. Shaw E.P., Rietschel J.C., Hendershot B.D., Pruziner A.L., Miller M.W., Hatfield B.D., Gentili R.J. Measurement of Attentional Reserve and Mental Effort for Cognitive Workload Assessment Under Various Task Demands During Dual-Task Walking. *Biol. Psychol.*, 2018, vol. 134, pp. 39–51. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2018.01.009>

15. Domínguez M.C., O’Keeffe C., O’Rourke E., Feerick N., Reilly R.B. Cortical Theta Activity and Postural Control in Non-Visual and High Cognitive Load Tasks: Impact for Clinical Studies. *2019 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*. Berlin, 2019, pp. 1539–1542. <https://doi.org/10.1109/embc.2019.8857663>
16. Kenny R.P.W., Eaves D.L., Martin D., Behmer L.P., Dixon J. The Effects of Textured Insoles on Cortical Activity and Quiet Bipedal Standing with and Without Vision: An EEG Study. *J. Mot. Behav.*, 2020, vol. 52, no. 4, pp. 489–501. <https://doi.org/10.1080/00222895.2019.1648237>
17. Peterson S.M., Ferris D.P. Differentiation in Theta and Beta Electrocortical Activity Between Visual and Physical Perturbations to Walking and Standing Balance. *eNeuro*, 2018, vol. 5, no. 4. Art. no. ENEURO.0207-18.2018. <https://doi.org/10.1523/eneuro.0207-18.2018>
18. Nguyen T.V., Balachandran P., Muggleton N.G., Liang W.-K., Juan C.-H. Dynamical EEG Indices of Progressive Motor Inhibition and Error-Monitoring. *Brain Sci.*, 2021, vol. 11, no. 4. Art. no. 478. <https://doi.org/10.3390/brainsci11040478>
19. Corp D.T., Youssef G.J., Clark R.A., Gomes-Osman J., Yücel M.A., Oldham S.J., Aldraiwiesh S., Rice J., Pascual-Leone A., Rogers M.A. Reduced Motor Cortex Inhibition and a ‘Cognitive-First’ Prioritisation Strategy for Older Adults During Dual-Tasking. *Exp. Gerontol.*, 2018, vol. 113, pp. 95–105. <https://doi.org/10.1016/j.exger.2018.09.018>
20. Putman P., Verkuil B., Arias-Garcia E., Pantazi I., van Schie C. EEG Theta/Beta Ratio as a Potential Biomarker for Attentional Control and Resilience Against Deleterious Effects of Stress on Attention. *Cogn. Affect. Behav. Neurosci.*, 2014, vol. 14, no. 2, pp. 782–791. <https://doi.org/10.3758/s13415-013-0238-7>
21. Angelidis A., van der Does W., Schakel L., Putman P. Frontal EEG Theta/Beta Ratio as an Electrophysiological Marker for Attentional Control and Its Test-Retest Reliability. *Biol. Psychol.*, 2016, vol. 121, pt. A, pp. 49–52. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2016.09.008>
22. Pizzamiglio S., Naeem U., Abdalla H., Turner D.L. Neural Correlates of Single- and Dual-Task Walking in the Real World. *Front. Hum. Neurosci.*, 2017, vol. 11. Art. no. 460. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2017.00460>
23. Bulea T.C., Kim J., Damiano D.L., Stanley C.J., Park H.-S. Prefrontal, Posterior Parietal and Sensorimotor Network Activity Underlying Speed Control During Walking. *Front. Hum. Neurosci.*, 2015, vol. 9. Art. no. 247. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00247>
24. Beurskens R., Helmich I., Rein R., Bock O. Age-Related Changes in Prefrontal Activity During Walking in Dual-Task Situations: A fNIRS Study. *Int. J. Psychophysiol.*, 2014, vol. 92, no. 3, pp. 122–128. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2014.03.005>
25. Hazlett E.A., Buchsbaum M.S., Mohs R.C., Spiegel-Cohen J., Wei T.-C., Azueta R., Haznedar M.M., Singer M.B., Shihabuddin L., Luu-Hsia C., Harvey P.D. Age-Related Shift in Brain Region Activity During Successful Memory Performance. *Neurobiol. Aging*, 1998, vol. 19, no. 5, pp. 437–445. [https://doi.org/10.1016/s0197-4580\(98\)00075-x](https://doi.org/10.1016/s0197-4580(98)00075-x)
26. Reuter-Lorenz P.A., Cappell K.A. Neurocognitive Aging and the Compensation Hypothesis. *Curr. Dir. Psychol. Sci.*, 2008, vol. 17, no. 3, pp. 177–182. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1467-8721.2008.00570.x>
27. Mirelman A., Maidan I., Bernad-Elazari H., Nieuwhof F., Reelick M., Giladi N., Hausdorff J.M. Increased Frontal Brain Activation During Walking While Dual Tasking: An fNIRS Study in Healthy Young Adults. *J. Neuroeng. Rehabil.*, 2014, vol. 11, no. 1. Art. no. 85. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-11-85>
28. Mirelman A., Maidan I., Bernad-Elazari H., Shustack S., Giladi N., Hausdorff J.M. Effects of Aging on Prefrontal Brain Activation During Challenging Walking Conditions. *Brain Cogn.*, 2017, vol. 115, pp. 41–46. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2017.04.002>
29. Steffener J., Stern Y. Exploring the Neural Basis of Cognitive Reserve in Aging. *Biochim. Biophys. Acta*, 2012, vol. 1822, no. 3, pp. 467–473. <https://doi.org/10.1016/j.bbadis.2011.09.012>
30. Lin M.-I.B., Lin K.-H. Walking While Performing Working Memory Tasks Changes the Prefrontal Cortex Hemodynamic Activations and Gait Kinematics. *Front. Behav. Neurosci.*, 2016, vol. 10. Art. no. 92. <https://doi.org/10.3389/fnbeh.2016.00092>
31. Barulli D., Stern Y. Efficiency, Capacity, Compensation, Maintenance, Plasticity: Emerging Concepts in Cognitive Reserve. *Trends Cogn. Sci.*, 2013, vol. 17, no. 10, pp. 502–509. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2013.08.012>
32. Takeuchi N., Mori T., Suzukamo Y., Tanaka N., Izumi S.-I. Parallel Processing of Cognitive and Physical Demands in Left and Right Prefrontal Cortices During Smartphone Use While Walking. *BMC Neurosci.*, 2016, vol. 17. Art. no. 9. <https://doi.org/10.1186/s12868-016-0244-0>

33. Cabeza R. Hemispheric Asymmetry Reduction in Older Adults: The HAROLD Model. *Psychol. Aging*, 2002, vol. 17, no. 1, pp. 85–100. <https://doi.org/10.1037//0882-7974.17.1.85>
34. Rosso A.L., Cenciari M., Sparto P.J., Loughlin P.J., Furman J.M., Huppert T.J. Neuroimaging of an Attention Demanding Dual-Task During Dynamic Postural Control. *Gait Posture*, 2017, vol. 57, pp. 193–198. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2017.06.013>
35. Karim H.T., Fuhrman S.I., Furman J.M., Huppert T.J. Neuroimaging to Detect Cortical Projection of Vestibular Response to Caloric Stimulation in Young and Older Adults Using Functional Near-Infrared Spectroscopy (fNIRS). *Neuroimage*, 2013, vol. 76, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.02.061>
36. Karim H., Schmidt B., Dart D., Beluk N., Huppert T. Functional Near-Infrared Spectroscopy (fNIRS) of Brain Function During Active Balancing Using a Video Game System. *Gait Posture*, 2012, vol. 35, no. 3, pp. 367–372. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2011.10.007>
37. Szameitat A.J., Schubert T., Müller K., von Cramon D.Y. Localization of Executive Functions in Dual-Task Performance with fMRI. *J. Cogn. Neurosci.*, 2002, vol. 14, no. 8, pp. 1184–1199. <https://doi.org/10.1162/089892902760807195>
38. Chen M., Pillemer S., England S., Izzetoglu M., Mahoney J.R., Holtzer R. Neural Correlates of Obstacle Negotiation in Older Adults: An fNIRS Study. *Gait Posture*, 2017, vol. 58, pp. 130–135. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2017.07.043>
39. Chen Y., Cao Z., Mao M., Sun W., Song Q., Mao D. Increased Cortical Activation and Enhanced Functional Connectivity in the Prefrontal Cortex Ensure Dynamic Postural Balance During Dual-Task Obstacle Negotiation in the Older Adults: A fNIRS Study. *Brain Cogn.*, 2022, vol. 163. Art. no. 105904. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2022.105904>
40. Chen Y., Yu Y., Niu R., Liu Y. Selective Effects of Postural Control on Spatial vs. Nonspatial Working Memory: A Functional Near-Infrared Spectral Imaging Study. *Front. Hum. Neurosci.*, 2018, vol. 12. Art. no. 243. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2018.00243>
41. Sala-Llonch R., Palacios E.M., Junqué C., Bargalló N., Vendrell P. Functional Networks and Structural Connectivity of Visuospatial and Visuooperceptual Working Memory. *Front. Hum. Neurosci.*, 2015, vol. 9. Art. no. 340. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00340>
42. de Souza Custódio J.C., Martins C.W., Lugon M.D., Fregni F., Nakamura-Palacios E.M. Epidural Direct Current Stimulation over the Left Medial Prefrontal Cortex Facilitates Spatial Working Memory Performance in Rats. *Brain Stimul.*, 2013, vol. 6, no. 3, pp. 261–269. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2012.07.004>
43. Dary Z., Lenggenhager B., Lagarde S., Medina Villalon S., Bartolomei F., Lopez C. Neural Bases of the Bodily Self as Revealed by Electrical Brain Stimulation: A Systematic Review. *Hum. Brain Mapp.*, 2023, vol. 44, no. 7, pp. 2936–2959. <https://doi.org/10.1002/hbm.26253>
44. Marusic U., Taube W., Morrison S.A., Biasutti L., Grassi B., De Pauw K., Meeusen R., Pisot R., Ruffieux J. Aging Effects on Prefrontal Cortex Oxygenation in a Posture-Cognition Dual-Task: An fNIRS Pilot Study. *Eur. Rev. Aging Phys. Act.*, 2019, vol. 16. Art. no. 2. <https://doi.org/10.1186/s11556-018-0209-7>
45. St. George R.J., Hinder M.R., Puri R., Walker E., Callisaya M.L. Functional Near-Infrared Spectroscopy Reveals the Compensatory Potential of Pre-Frontal Cortical Activity for Standing Balance in Young and Older Adults. *Neuroscience*, 2021, vol. 452, pp. 208–218. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2020.10.027>
46. Saraiva M., Castro M.A., Vilas-Boas J.P. Muscular and Prefrontal Cortex Activity During Dual-Task Performing in Young Adults. *Eur. J. Investig. Health Psychol. Educ.*, 2023, vol. 13, no. 4, pp. 736–747. <https://doi.org/10.3390/ejihpe13040055>
47. Bayot M., Dujardin K., Tard C., Defebvre L., Bonnet C.T., Allart E., Delval A. The Interaction Between Cognition and Motor Control: A Theoretical Framework for Dual-Task Interference Effects on Posture, Gait Initiation, Gait and Turning. *Neurophysiol. Clin.*, 2018, vol. 48, no. 6, pp. 361–375. <https://doi.org/10.1016/j.neucli.2018.10.003>
48. Tirapu-Ustárroz J., García-Molina A., Luna-Lario P., Roig-Rovira T., Pelegrín-Valero C. Modelos de funciones y control ejecutivo (I). *Rev. Neurol.*, 2008, vol. 46, no. 11, pp. 684–692. <http://dx.doi.org/10.33588/rn.4611.2008119>

Поступила в редакцию 19.07.2023 / Одобрена после рецензирования 26.10.2023 / Принята к публикации 30.10.2023.
Submitted 19 July 2023 / Approved after reviewing 26 October 2023 / Accepted for publication 30 October 2023.