

Микадзе Ю.В.<sup>1,2</sup>, Богданова М.Д.<sup>1</sup>, Лысенко Е.С.<sup>1,2</sup>, Абузайд С.М.<sup>3</sup>, Шахнович А.Р.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Факультет психологии ФГБОУ ВО «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова», Москва, Россия;

<sup>2</sup>Психолого-социальный факультет ФГБОУ ВО «Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова», Москва, Россия; <sup>3</sup>ФГАУ «Научно-исследовательский институт нейрохирургии им. акад. Н.Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Россия

<sup>1</sup>119991, Москва, Ленинские горы, 1; <sup>2</sup>117997, Москва, ул. Островитянова, 1; <sup>3</sup>125047, Москва, 4-я Тверская-Ямская ул., 16

## Изучение функциональной специализации полушарий мозга с помощью метода транскраниальной ультразвуковой доплерографии (обзор зарубежной литературы)

Представлен обзор работ, в которых метод функциональной транскраниальной ультразвуковой доплерографии используется в разных областях нейрокognитивных исследований. Обсуждаются достоинства и недостатки метода в решении теоретических и практических задач и перспективы его применения.

**Ключевые слова:** функциональная специализация полушарий; доплерография; скорость кровотока; мозговые артерии; когнитивные нагрузки; вербальный стимульный материал; невербальный стимульный материал.

**Контакты:** Юрий Владимирович Микадзе; [ymikadze@yandex.ru](mailto:ymikadze@yandex.ru)

**Для ссылки:** Микадзе ЮВ, Богданова МД, Лысенко ЕС и др. Изучение функциональной специализации полушарий мозга с помощью метода транскраниальной ультразвуковой доплерографии (обзор зарубежной литературы). *Неврология, нейропсихиатрия, психосоматика*. 2016;8(4):51–56.

### *Transcranial Doppler ultrasound study of brain hemispheric functional specialization: A review of foreign literature*

*Mikadze Yu.V.<sup>1,2</sup>, Bogdanova M.D.<sup>1</sup>, Lysenko E.S.<sup>1,2</sup>, Abuzaid S.M.<sup>3</sup>, Shakhnovich A.R.<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Faculty of Psychology, M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; <sup>2</sup>Sociopsychological Faculty, N.I. Pirogov Russian National Research Medical University, Moscow, Russia; <sup>3</sup>Acad. N.N. Burdenko Research Institute of Neurosurgery, Ministry of Health of Russia, Moscow, Russia

<sup>1</sup>1, Leninsky Gory, Moscow 119991; <sup>2</sup>1, Ostrovityanov St., Moscow 117997; <sup>3</sup>16, Fourth Tverskaya-Yamskaya St., Moscow 125047

The paper provides a review of the works in which functional transcranial Doppler ultrasound is used in different areas of neurocognitive studies. It discusses the advantages and disadvantages of the technique in solving theoretical and practical problems and prospects of its use.

**Keywords:** hemispheric functional specialization; Doppler study; blood flow velocity; cerebral arteries; cognitive loads; verbal stimulus material; non-verbal stimulus material.

**Contact:** Yuri Vladimirovich Mikadze; [ymikadze@yandex.ru](mailto:ymikadze@yandex.ru)

**For reference:** Mikadze YuV, Bogdanova MD, Lysenko ES, et al. Transcranial Doppler ultrasound study of brain hemispheric functional specialization: A review of foreign literature. *Nevrologiya, neiropsikhiatriya, psikhosomatika* = Neurology, neuropsychiatry, psychosomatics. 2016;8(4):51–56.

**DOI:** <http://dx.doi.org/10.14412/2074-2711-2016-4-51-56>

Изучение функциональной специализации полушарий и межполушарной асимметрии является предметом исследований в ряде нейронаук. Особый интерес представляет нейрокognитивный подход, при использовании которого ставится задача описания структурно-функциональной организации разных видов психической деятельности и верификации ее психологической структуры и мозговой основы с помощью нейропсихологических и нейровизуализирующих методов [1]. Нейрокognитивный подход, по словам Л. Сквайра, позволяет устанавливать важные связи между когнитивной психологией и неврологией [2].

Для определения активности различных центров мозга, отражающей переработку информации, используются электроэнцефалография (ЭЭГ) и различные нейровизуализирующие методы (функциональная магнитно-резонансная томография — фМРТ, позитронно-эмиссионная томография — ПЭТ и др.), которые наряду с достоинствами имеют определенные ограничения и недостатки, разные степени сложности обслуживания и стоимость использования.

Функциональная транскраниальная ультразвуковая доплерография (ФТКУЗДГ) — сравнительно недорогой, неинвазивный и безболезненный метод оценки скорости кровотока (СК). ФТКУЗДГ обеспечивает высокое временное разрешение, гораздо более высокое, чем, например, фМРТ. При ее проведении пациент не должен оставаться неподвижным, наличие металлических имплантатов, татуировок не влияет на результаты исследования, метод является щадящим для людей, страдающих клаустрофобией.

К очевидным недостаткам ФТКУЗДГ относится низкое пространственное разрешение в пределах одного полушария, что накладывает ограничения при определении внутриполушарных различий.

В последние десятилетия ФТКУЗДГ в сочетании с разными видами когнитивных нагрузок активно используется в исследовательских и прикладных целях для определения функциональной специализации полушарий. Большинство публикаций, посвященных использованию метода ФТКУЗДГ в нейрокогнитивных исследованиях, представлены в зарубежной литературе, и количество статей имеет выраженную тенденцию к увеличению: если в 1987–1991 гг. было опубликовано всего 15 таких исследований, то с 2007 по 2011 г. их число выросло уже до 274 [3].

#### Общая характеристика метода ФТКУЗДГ

Первые сообщения о применении эффекта Допплера для измерения СК появились в 1961 г., а первые клинические исследования с его использованием — в 1982 г. [4]. Процедура ФТКУЗДГ детально описана во многих статьях [5–8]. Чаще всего используется два датчика для одновременного двустороннего измерения СК. Датчики располагаются в «височном окне» — в этой области кость черепа достаточно тонкая для оптимального прохождения ультразвукового сигнала. В «височном окне» открывается доступ к трем мозговым артериям: передней (ПМА), средней (СМА), задней (ЗМА). В область кровоснабжения СМА попадают височные и теменные отделы мозга, наружная и внутренняя поверхность лобных долей, ЗМА — затылочные и теменные области мозга, задние и медиобазальные отделы височной коры, ПМА — медиальная поверхность лобной и теменной долей, часть орбитальной поверхности лобной доли, наружная поверхность первой лобной извилины, верхняя часть центральных и верхней теменной извилин.

В большинстве исследований проводилось измерение СК в СМА. Это может быть связано с несколькими причинами. Наиболее частый выбор СМА для исследования, с одной стороны, определяется анатомическими особенностями кровоснабжения областей мозга. Наличие так называемых зон перекрытия, в которых одну и ту же область мозга питают разные артерии, позволяет отдавать предпочтение при исследованиях СМА. На более частое использование в исследованиях СМА влияет также более быстрое и удобное ее определение по сравнению с другими артериями [9–18].

Д.А. Washburn и соавт. [3] в обзоре, посвященном анализу различных методов нейровизуализации, отмечают что доплерография не является прямым измерением нейрональной активности, сопровождающей когнитивные операции, а определяет лишь СК, которая указывает на наличие нейрональной активности где-то в области перфузии, связанной с увеличением ментальной активности. В то же время, сопоставляя доплерографию с другими технологиями, используемыми в нейрокогнитивных исследованиях, авторы отмечают по крайней мере три наиболее перспективных направления ее применения, которые связаны с исследованием: а) межполушарных различий; б) индивидуальных и групповых различий; в) наличия ментальных усилий даже при отсутствии явных поведенческих проявлений, например в ситуациях непроизвольного и произвольного когнитивного контроля.

#### Проблема межполушарной функциональной асимметрии и функциональной специализации полушарий

В ряде исследований с применением ФТКУЗДГ, представлены данные, свидетельствующие о выраженной связи левого полушария (по сравнению с правым) с обработкой вербальных стимулов, а также о не столь очевидном преобладании активности правого полушария (по сравнению с левым) при переработке зрительно-пространственной и других типов невербальной информации. При определении латеральной специфичности полушарий по вербальным функциям использовались когнитивные нагрузки с разными вариантами стимульного материала и разными процедурами его переработки [3]. Было показано, что выполнение таких заданий, как чтение вслух и чтение про себя [18, 10], отнесение слов к семантическим категориям [11], построение предложений [14], называние слов на определенную букву (лексическая беглость) [14, 19], поиск синонимов и антонимов к стимульным словам [11], называние букв [20], сопровождалось большим усилением СК в сосудах левого полушария по сравнению с правым.

Исследования усиления СК в сосудах правого полушария при выполнении когнитивных заданий с невербальным стимульным материалом дают обратную картину: наблюдается более высокая правополушарная активность по отношению к неречевым функциям. Это показано при выполнении заданий на зрительно-пространственные функции: визуальный поиск предметов [12], мысленное вращение куба [11], сравнение фигур [21], восприятие лиц [22] и при прослушивании отрывков музыкальных произведений [23].

В исследовании А. Flöel и соавт. [16], которое включало 75 здоровых участников, определяли латерализацию полушарий по вербальным и невербальным функциям. В качестве вербальной когнитивной нагрузки использовался тест на называние слов на определенную букву, которая появлялась на экране монитора (Verbal fluency test). Невербальным вариантом когнитивной нагрузки выступал тест Лардмарка (Lardmark test), в котором требовалось отслеживать и отмечать перемещение линии на экране. Выполнение каждого задания сопровождалось двусторонним измерением СК в СМА. Результаты исследования подтвердили преимущественное увеличение у большинства испытуемых СК в левом полушарии при выполнении вербального задания и в правом полушарии при выполнении невербального задания [16].

В большинстве исследований в связи с плохим пространственным разрешением доплерографии чаще ставится вопрос о латерализации процесса, а не о его локализации в пределах полушария. В то же время в некоторых работах предпринимаются попытки оценить специфический вклад разных отделов каждого полушария мозга в процесс переработки информации по различиям в усилении СК в разных артериях одного полушария при выполнении тех или иных видов когнитивной нагрузки. N. Stroobant и соавт. [10] рассматривают вопросы не только специфической активности разных полушарий при выполнении вербальных и зрительно-пространственных когнитивных заданий, но и специфического участия разных отделов каждого полушария. Так, на основании различий в изменении СК в ПМА и ЗМА делается вывод о большей вовлеченности лобных отделов в выполнение вербальных заданий и задних отделов в выполнение зрительно-пространственных заданий [11].

Наиболее устойчивым результатом во всех исследованиях с применением ФТКУЗДГ было выявление активации левого полушария при выполнении вербальных заданий, в то время как результаты, связанные с выполнением невербальных заданий, отличаются высокой вариативностью. Выявляемые при переработке вербального материала закономерности позволяют предполагать, в частности, перспективность создания протокола определения доминантности полушария по речи с помощью метода ФТКУЗДГ. Такая возможность также обосновывается перекрестными проверками результатов, полученных с помощью методов ФТКУЗДГ и теста Wada [24–26], ФТКУЗДГ и фМРТ [27, 28], ФТКУЗДГ и ЭЭГ [29], которые подтвердили достоверность результатов доплерографии.

#### **Проблема оценки уровня ментальных усилий**

Возможность выявления умственных усилий в значительной степени может быть связана с проблемой управляющих функций. Так, многие исследователи описывают два типа когнитивного контроля при реализации поведения. Некоторые виды поведения осуществляются автоматически, реактивно, другие требуют планирования и сознательного контроля. И для автоматического, и для контролируемого взаимодействия со средой необходима нейронная активность, но автоматическое, рефлекторное поведение не опирается на когнитивную переработку. ФТКУЗДГ может стать инструментом для выявления и доказательства наличия умственных усилий, которые сопровождают планирование и сознательный контроль [30–33].

Опубликованы работы, в которых ставилась задача определения степени латерализации кровотока при выполнении заданий, требующих планирования и внимания. Выполнение задания сказывается на латерализации и ее степени выраженности у разных участников [34–35]. Так, D. Schuepbach и соавт. [36] при оценке эффектов устойчивости и потери стратегии выполнения задания и изменения СК в СМА в обоих полушариях обнаруживали пик (максимум) в передних зонах, что свидетельствует о большей вовлеченности передних отделов.

Сравнительный анализ изменения СК и продуктивности выполнения когнитивных заданий в группах участников, сформированных по особым критериям, позволяет оценить уровень затраченных ментальных усилий. В таких исследованиях на основе стратегии крайних значений формировались группы, участники которых показывали высокие и низкие результаты продуктивности. Затем при сопоставлении с показателями усиления СК анализировали когнитивные и ментальные различия между индивидами с высокими и низкими показателями выполнения заданий [37–40]. Результаты большинства исследований подтвердили, что более успешное или более быстрое выполнение задания сопровождается большим усилением СК по сравнению с ее показателями в покое. S. Duschek и соавт. [34] сравнивали СК в двух группах при выполнении простого задания на время реакции (исследовалось слуховое внимание). Более успешное выполнение задания сочеталось с относительно более высокой СК билатерально по сравнению с этим показателем при менее успешном выполнении задания. Это позволяет предположить, что качество выполнения задания зависит от уровня затрачен-

ных ментальных усилий и это находит отражение в разном характере изменения СК при разном выполнении заданий.

В другом исследовании участникам предлагали выполнить батарею тестов на внимание (ASAP), затем формировали группы в зависимости от результата — с более или менее успешным выполнением задания. Баллы, полученные при обследовании по этой методике, имели положительную достоверную корреляцию с успешностью выполнения теста Струпа, а также временем, затраченным на ответ. Результаты выполнения методики ASAP проявились и в изменении СК. Как и в предыдущем исследовании, успешность выполнения задания была напрямую связана с показателями СК в обоих полушариях — они были выше при более успешном результате [41].

В другом исследовании использовалась похожая стратегия анализа выполнения заданий по крайним (экстремальным) результатам [15]. В течение 36 мин участники должны были «выстреливать» в целевые стимулы, появляющиеся на экране. Целевые стимулы задавались в инструкции. После выполнения задания выборку группировали по времени реакции, затраченной на ответ, и по точности — правильности выполнения задания. У всех участников регистрировали изменение СК. В группе испытуемых, которые тратили меньше времени на ответ, фиксировалась более выраженная левосторонняя латерализация усиления СК, чем в группе участников, которым требовалось больше времени на выполнение задания.

В этом исследовании изучалась также латерализация в отношении функции внимания в зависимости от установки участника на выполнение задания [15]. Испытуемым предлагалось следить за картинкой и давать быстрый и точный ответ (стрелять/не стрелять) на целевые/нецелевые стимулы. При этом происходила активация обоих полушарий, но средняя СК была выше (по отношению к исходной) в левом полушарии, чем в правом. В последующих исследованиях [42] уже подробнее изучали церебральную асимметрию, и снова подтвердилось преимущество левого полушария при активации установки на поиск объекта. Результаты этих исследований расходятся с ранее полученными данными [15], в соответствии с которыми при выполнении такого же задания не наблюдалось преимущественного усиления СК в левом полушарии. Интересный результат, указывающий на чувствительность ФТКУЗДГ к изменению условий выполнения заданий, был получен в ряде работ. Оказалось, что время выполнения задания и устойчивость внимания на объект меняют латерализацию по показателям СК. Так, при увеличении времени выполнения задания по данным ФТКУЗДГ была выявлена преимущественно правосторонняя латерализация СК [8, 15, 32]. В другом исследовании результаты изменения СК указывают на одинаковую активацию обоих полушарий при выполнении задания, в котором необходимо отыскать предметы на картинках, но длительная установка на поиск объектов смещает асимметрию в пользу правого полушария [15].

#### **Проблема индивидуальных и групповых различий**

Еще одна область использования ФТКУЗДГ — оценка индивидуальных и групповых различий.

N. Stroobant и G. Vingerhoets [43] на основании данных о степени латерализации мозгового кровотока обобщили результаты разных исследований по полу, возрасту, право- и леворукости. В частности, было выявлено, что у пожилых людей СК ниже и степень латерализации прослеживается менее четко, чем у молодых. У женщин отмечались более высокие показатели СК по сравнению с мужчинами. Латерализация СК у леворуких была менее четко выражена, чем у праворуких [43].

Предпринимались попытки обнаружить индивидуальные различия СК в зависимости не только от типа перерабатываемого материала, но и от вида психической деятельности. L. Вгассо и соавт. [14] исследовали разные виды деятельности и работу с разными типами стимулов. Предполагалось, что выполнение заданий будет сопровождаться разной степенью латерализации в группах участников, которые различались по полу и *возрасту*. В исследование было включено 70 праворуких испытуемых (35 мужчин и 35 женщин), которые были разделены на две возрастные группы: 21–40 лет и 41–60 лет. При регистрации СК в СМА предлагалось выполнить четыре задания: распознавание и называние геометрических фигур, вербальное описание локализации объектов на картинке, словесное описание комнаты, выполнение арифметических действий. Результаты исследования показали достоверную левостороннюю латерализацию в увеличении СК при словесном описании комнаты и выполнении арифметических действий и правостороннюю латерализацию при описании локализации объектов на картинке в группе участников 21–40 лет. Такой закономерности не обнаружено в группе участников старшего возраста [14]. Результаты другого исследования также подтверждают влияние возраста на латерализацию [44]. Отмечается, что независимо от типа нагрузки (вербальная или зрительно-пространственная) более четко выраженная латерализация кровотока имеет место у молодых участников.

При исследовании различий по *полу* установлено, что более выраженное усиление СК в левом полушарии отмечается у женщин при словесном описании комнаты [14]. В другом исследовании женщины продемонстрировали более выраженную правостороннюю латерализацию при выполнении пространственных заданий на мысленное пространственное вращение [45].

В ряде тестов, направленных на исследование мышления, управляющих функций, были показаны различия в изменении СК в зависимости от пола. P.C. Njemanze [46] исследовал межполушарные различия у мужчин и женщин при выполнении матриц Равена: у женщин наблюдалась левополушарная латерализация большего усиления СК, у мужчин — правополушарная. D. Schuepbach и соавт. [9] использовали висконсинский тест и отметили связь между скоростью его выполнения и показателем СК у женщин в отличие от мужчин (чем медленнее шло выполнение задания, тем ниже были показатели СК [47]), а при изучении управляющих функций (Trail Making Test) авторы обнаружили такие же различия в усилении СК в зависимости от пола, как и в предыдущем исследовании, но с наибольшим усилением СК в СМА.

Исследований особенностей изменения СК у пациентов с различными формами патологии гораздо меньше, и они не носят систематизированного характера. Имеются работы, в которых проводились обследование пациентов с дислексией [48], эпилепсией [26, 49, 50], шизофренией [35, 51, 52], изучение внимания у пациентов с наличием и отсутствием артериальной гипертензии [53], у пожилых пациентов с признаками и без признаков депрессии [54], управляющих функций у пациентов с болезнью Гентингтона [55], ментальной активности у здоровых и пациентов в восстановительном периоде после инсульта [56–58]. В этих работах в зависимости от нозологии ставились разные цели. Так, у больных эпилепсией было важным определить доминантное по речи полушарие в предоперационный период, у больных дислексией и инсультом — нарушение и сохранность речевых функций, у больных шизофренией — сохранность функций планирования и контроля. В ряде исследований не обнаружено различий в изменении СК при сопоставлении результатов у пациентов с той или иной патологией и здоровых. Исключения в виде снижения СК были выявлены у больных шизофренией [51], депрессией [54] болезнью Гентингтона [55] по сравнению со здоровыми. Напротив, у детей с серповидно-клеточной анемией при плохом выполнении когнитивных заданий наблюдалась аномально высокая СК [59]. Результаты этих исследований позволяют предположить, что СК и степень выраженности латерализации при выполнении заданий в большей степени зависят от нарушения функций планирования и контроля и не связаны или связаны, в меньшей степени с нарушением других исследуемых функций.

### Заключение

Обзор работ, посвященных применению ФТКУЗДГ, позволяет очертить круг задач (как исследовательских, так и прикладных), для решения которых перспективно использование этого метода.

В нейрокогнитивных, в частности нейропсихологических, исследованиях ФТКУЗД может быть полезна для верификации данных об активности и динамике вовлеченности левого и правого полушарий в выполнение психической деятельности, связанной с переработкой разных типов материала, в том числе для оценки доминантности по речи.

Другой областью применения этого метода может быть исследование особенностей влияния индивидуальных и популяционных факторов на характер функциональной специализации и взаимодействия полушарий. Такие исследования имеют прикладное значение, в частности для оценки профпригодности, профподбора и профориентации.

Еще одно направление использования метода — контроль ментальной активности, которая не сопровождается внешними поведенческими проявлениями.

**Работа выполнена при финансовой поддержке Российского гуманитарного научного фонда (проект 15-06-10636 «Исследование функциональной специализации полушарий мозга нейропсихологическими и ультразвуковыми методами в норме и патологии»).**



## ЛИТЕРАТУРА

1. Гордон ВМ. Функциональная структура. В кн.: Мещеряков БГ, Зинченко ВП, редакторы. Большой психологический словарь. Москва: АСТ; 2003. С. 583. [Gordon VM. Functional structure. In: Meshcheryakov BG, Zinchenko VP, editors. *Bol'shoi psikhologicheskii slovar'* [Big psychological dictionary]. Moscow: AST; 2003. P. 583.]
2. Солсо Р. Когнитивная психология. 6-е изд. Санкт-Петербург: Питер; 2006. 589 с. [Solso R. *Kognitivnaya psikhologiya* [Cognitive psychology]. 6<sup>th</sup> ed. Saint-Petersburg: Piter; 2006. 589 p.]
3. Washburn DA, Schultz NB, Phillips HA. Transcranial Doppler Sonography in Studies of Mental Effort. In: Thoris K, editor. *Sonography*. 2012. P. 227-48.
4. Aaslid R, Markwalder TM, Nornes H. Noninvasive transcranial Doppler ultrasound recording of flow velocity in basal cerebral arteries. *J Neurosurg*. 1982 Dec;57(6):769-74.
5. Aaslid, R. Visually evoked dynamic blood flow response of the human cerebral circulation. *Stroke*. 1987 Jul-Aug;18(4):771-5.
6. McCartney JP, Thomas-Lukes KM, Gomes CR. *Handbook of Transcranial Doppler*. Springer; 1997. 92 p.
7. Stoobant N, Vingerhoets G. Transcranial Doppler ultrasonography monitoring of cerebral hemodynamics during performance of cognitive tasks: a review. *Neuropsychol Rev*. 2000 Dec;10(4):213-31.
8. Helton WS, Hollander TD, Warm JS, et al. The abbreviated vigilance task and cerebral hemodynamics. *J Clin Exp Neuropsychol*. 2007 Jul;29(5):545-52.
9. Schuepbach D, Huizinga M, Duschek S, et al. Rapid cerebral hemodynamic modulation during set shifting: evidence of time-locked associations with cognitive control in females. *Brain Cogn*. 2009 Dec;71(3):313-9. doi: 10.1016/j.bandc.2009.07.006. Epub 2009 Aug 15.
10. Stroobant N, Buijs D, Vingerhoets G, et al. Variation in brain lateralization during various language tasks: A functional transcranial Doppler study. *Behav Brain Res*. 2009 May 16;199(2):190-6. doi: 10.1016/j.bbr.2008.11.040. Epub 2008 Dec 3.
11. Vingerhoets G, Stroobant N. Lateralization of cerebral blood flow velocity changes during cognitive tasks. A simultaneous bilateral transcranial Doppler study. *Stroke*. 1999; Oct;30(10):2152-8.
12. Whitehouse AJ, Badcock N, Groen MA, Bishop DV. Reliability of a novel paradigm for determining hemispheric lateralization of visuospatial function. *J Int Neuropsychol Soc*. 2009 Nov;15(6):1028-32. doi: 10.1017/S1355617709990555. Epub 2009 Aug 27.
13. Groen MA, Whitehouse AJ, Badcock NA, Bishop DV. Where were those rabbits? A new paradigm to determine cerebral lateralisation of visuospatial memory function in children. *Neuropsychologia*. 2011; Oct; 49(12):3265-71.
14. Bracco L, Bessi V, Alari F, et al. Cerebral hemodynamic lateralization during memory tasks as assessed by functional transcranial Doppler (fTCD) sonography: effects of gender and healthy aging. *Cortex*. 2011; Jun;47(6):750-8.
15. Schultz NB, Matthews G, Warm JS, Washburn DA. A transcranial Doppler sonography study of shoot/don't-shoot responding. *Behavior Research Methods*. 2009; Aug; 41(3): 593-7.
16. Flöel A, Buyx A, Breitenstein C, et al. Behavior Brain Research. Hemispheric lateralization of spatial attention in right- and left-hemispheric language dominance. *Behav Brain Res*. 2005 Mar 30;158(2):269-75.
17. Dorst J, Haag A, Knake S, et al. Functional transcranial Doppler sonography and a spatial orientation paradigm identify the non-dominant hemisphere. *Brain Cogn*. 2008 Oct;68(1): 53-8. doi: 10.1016/j.bandc.2008.02.123. Epub 2008 Jul 14.
18. Basic S, Hajnsek S, Poljakovic Z, et al. Determination of cortical language dominance using functional transcranial Doppler sonography in left-handers. *Clin Neurophysiol*. 2004 Jan;115(1):154-60.
19. Boban M, Crnac P, Junakovic A, et al. Blood flow velocity changes in anterior cerebral arteries during cognitive tasks performance. *Brain Cogn*. 2014 Feb;84(1):26-33. doi: 10.1016/j.bandc.2013.10.006. Epub 2013 Nov 22.
20. Gutierrez-Sigut E, Payne H, MacSweeney M. Investigating language lateralization during phonological and semantic fluency tasks using functional transcranial Doppler sonography. *Laterality*. 2015;20(1):49-68. doi: 10.1080/1357650X.2014.914950. Epub 2014 May 29.
21. Haag A, Moeller N, Knake S, et al. Language lateralization in children using functional transcranial Doppler sonography. *Dev Med Child Neurol*. 2010 Apr;52(4):331-6. doi: 10.1111/j.1469-8749.2009.03362.x. Epub 2009 Aug 28.
22. Njemanze PC, Gomez CR, Horenstein S. Cerebral lateralization and color perception: a transcranial Doppler study. *Cortex*. 1992; Mar;28(1):69-75.
23. Markus HS, Boland M. «Cognitive activity» monitored by non-invasive measurement of cerebral blood flow velocity and its application to the investigation of cerebral dominance. *Cortex*. 1992; Dec;28(4):575-81.
24. Knecht S, Deppe M, Ebner A, et al. Noninvasive determination of language lateralization by functional transcranial Doppler sonography: a comparison with the Wada test. *Stroke*. 1998 Jan;29(1):82-6.
25. Knake S, Haag A, Hamer HM, et al. Language lateralization in patients with temporal lobe epilepsy: a comparison of functional transcranial Doppler sonography and the Wada test. *Neuroimage*. 2003 Jul;19(3):1228-32.
26. Witt JA, Pröbmler K, Maydych V, Helmstaedter C. Cross-validation of the Animation Description Paradigm applied to determine language dominance via functional transcranial Doppler sonography. *Epilepsy & Behavior*. 2010; Apr;17(4):611-611.
27. Schmidt P, Krings T, Willmes K, et al. Determination of cognitive hemispheric lateralization by «functional» transcranial Doppler cross-validated by functional MRI. *Stroke*. 1999; May;30(5):939-45.
28. Deppe M, Knecht S, Papke K, et al. Assessment of hemispheric language lateralization: a comparison between fMRI and fTCD. *J Cereb Blood Flow Metab*. 2000 Feb;20(2):263-8.
29. Szirmai I, Amrein I, Palvölgyi L, et al. Correlation between blood flow velocity in the middle cerebral artery and EEG during cognitive effort. *Brain Res Cogn Brain Res*. 2005 Jun;24(1):33-40.
30. Banich M. Executive Function The Search for an Integrated Account. *Current Directions in Psychological Science*. 2009;18(2):89-94.
31. Braver TS, Paxton JL, Locke HS, Barch DM. Flexible neural mechanisms of cognitive control within human prefrontal cortex. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2009 May 5;106(18):7351-6. doi: 10.1073/pnas.0808187106. Epub 2009 Apr 20.
32. Hitchcock EM, Warm JS, Matthews G, et al. Automation cueing modulates cerebral blood flow and vigilance in a simulated air traffic control task. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*. 2003;4(1-2):89-112.
33. Vingerhoets G, Luppens E. Cerebral blood flow velocity changes during dichotic listening with directed or divided attention: A transcranial Doppler ultrasonography study. *Neuropsychologia*. 2001;39(10):1105-11.
34. Duschek S, Schuepbach D, Schandry R. Time-locked association between rapid cerebral blood flow modulation and attentional performance. *Clin Neurophysiol*. 2008 Jun;119(6):1292-9. doi: 10.1016/j.clinph.2008.01.102. Epub 2008 Apr 3.
35. Schuepbach D, Boeker H, Duschek S, Hell D. Rapid cerebral hemodynamic modulation during mental planning and movement execution: evidence of time-locked relationship with complex behavior. *Clin Neurophysiol*. 2007 Oct;118(10):2254-62. Epub 2007 Sep 4.
36. Schuepbach D, Bader JP, Hell D, Baumgartner RW. Cerebral hemodynamics and processing speed during category learning. *Neuroreport*. 2004 May 19;15(7):1195-8.
37. Chein JM, Moore AB, Conway AR. Domain-general mechanisms of complex working memory span. *Neuroimage*. 2011 Jan 1;54(1):550-9. doi: 10.1016/j.neuroimage.2010.07.067. Epub 2010 Aug 4.
38. Kleider HM, Parrott DJ, King TZ. Shooting behavior: How working memory and negative emotionality influence police officer shoot decisions. *Applied Cognitive Psychology*. 2010;(24):707-17.
39. Nishizaki Y, Osaka M. Text comprehension and individual differences in working memory: the different contributions of the storage and

- the retrieval processing. *Shinrigaku Kenkyu*. 2004 Aug;75(3):220-8.
40. Unsworth N, Engle RW. Speed and accuracy of accessing information in working memory: an individual differences investigation of focus switching. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn*. 2008 May;34(3):616-30. doi: 10.1037/0278-7393.34.3.616.
41. Washburn DA, Smith JD, Taglialetela LA. Individual Differences in Metacognitive Responsiveness: Cognitive and Personality Correlates. *J Gen Psychol*. 2005 Oct;132(4):446-461.
42. Schultz NB, Phillips HA, Washburn DA. Lateral asymmetries in cerebral bloodflow velocity related to attention-task performance. Poster presented at the annual meeting of the Psychonomic Society. 2010.
43. Stroobant N, Vingerhoets G. Transcranial Doppler ultrasonography monitoring of cerebral hemodynamics during performance of cognitive tasks: a review. *Neuropsychol Rev*. 2000 Dec;10(4):213-31.
44. Sorond FA, Schnyer DM, Serrador JM. Cerebral blood flow regulation during cognitive tasks: effects of healthy aging. *Cortex*. 2008 Feb;44(2):179-84. doi: 10.1016/j.cortex.2006.01.003. Epub 2007 Nov 17.
45. Walter KD, Roberts AE, Brownlow S. Spatial perception and mental rotation produce gender differences in cerebral hemovelocity: A TCD study. *Journal of Psychophysiology*. 2000;14(1):37-45.
46. Njemanze PC. Cerebral lateralization and general intelligence: gender differences in a transcranial Doppler study. *Brain Lang*. 2005 Mar;92(3):234-9.
47. Misteli M, Duschek S, Richter A, et al. Gender characteristics of cerebral hemodynamics during complex cognitive functioning. *Brain Cogn*. 2011 Jun;76(1):123-30. doi: 10.1016/j.bandc.2011.02.009. Epub 2011 Mar 21.
48. Illingworth S, Bishop DV. Atypical cerebral lateralisation in adults with compensated developmental dyslexia demonstrated using functional transcranial Doppler ultrasound. *Brain Lang*. 2009 Oct;111(1):61-5. doi: 10.1016/j.bandl.2009.05.002. Epub 2009 Jun 13.
49. Strzelczyk A, Haag A, Raupach H. Prospective evaluation of a post-stroke epilepsy risk scale. *J Neurol*. 2010 Aug;257(8):1322-6. doi: 10.1007/s00415-010-5520-9. Epub 2010 Mar 23.
50. Janszky J, Jokeit H, Heinemann D. Epileptic activity influences the speech organization in medial temporal lobe epilepsy. *Brain*. 2003 Sep;126(Pt 9):2043-51. Epub 2003 Jun 23.
51. Feldmann D, Schuepbach D, von Rickenbach B. Association between two distinct executive tasks in schizophrenia: a functional transcranial Doppler sonography study. *BMC Psychiatry*. 2006 May 24;6:25.
52. Schuepbach D, Weber S, Kawohl W, Hell D. Impaired rapid modulation of cerebral hemodynamics during a planning task in schizophrenia. *Clin Neurophysiol*. 2007 Jul;118(7):1449-59. Epub 2007 Apr 23.
53. Duschek S, Schandry R. Cognitive performance and cerebral blood flow in essential hypotension. *Psychophysiology*. 2004 Nov;41(6):905-13.
54. Tiemeier H, Bakker SL, Hofman A, et al. Cerebral haemodynamics and depression in the elderly. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*. 2002 Jul;73(1):34-9.
55. Deckel AW, Cohen D, Duckrow R. Cerebral blood flow velocity decreases during cognitive stimulation in Huntington's disease. *Neurology*. 1998 Dec;51(6):1576-83.
56. Bragoni M, Caltagirone C, Troisi E, et al. Correlation of cerebral hemodynamic changes during mental activity and recovery after stroke. *Neurology*. 2000 Jul 12;55(1):35-40.
57. Silvestrini M, Troisi E, Matteis M. Involvement of the healthy hemisphere in recovery from aphasia and motor deficit in patients with cortical ischemic infarction: a transcranial Doppler study. *Neurology*. 1995 Oct;45(10):1815-20.
58. Silvestrini M, Troisi E, Matteis M. Correlations of flow velocity changes during mental activity and recovery from aphasia in ischemic stroke. *Neurology*. 1998 Jan;50(1):191-5.
59. Sanchez CE, Schatz J, Roberts CW. Cerebral blood flow velocity and language functioning in pediatric sickle cell disease. *J Int Neuropsychol Soc*. 2010 Mar;16(2):326-34. doi: 10.1017/S1355617709991366. Epub 2010 Feb 3

Поступила 01.10.2016

#### Декларация о финансовых и других взаимоотношениях

Исследование не имело спонсорской поддержки. Авторы несут полную ответственность за предоставление окончательной версии рукописи в печать. Все авторы принимали участие в разработке концепции статьи и написании рукописи. Окончательная версия рукописи была одобрена всеми авторами.