

Роль магнитно-резонансной томографии в изучении нейрофизиологических коррелятов исполнительных функций у детей

Екатерина Владимировна Короткова

Александр Игоревич Котюсов

Ксения Игоревна Кунникова

Полина Константиновна Ус

Юлия Евгеньевна Леушина

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
Екатеринбург, Россия

Ольга Александровна Львова

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
Уральский государственный медицинский университет,
Екатеринбург, Россия

The Role of Magnetic Resonance Tomography in the Study of Neurophysiological Correlates of Executive Function in Children

Ekaterina V. Korotkova

Alexander I. Kotyusov

Ksenia I. Kunnikova

Polina K. Us

Yuliya E. Leushina

Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin,
Yekaterinburg, Russia

Olga A. Lvova

Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin,
Ural State Medical University,
Yekaterinburg, Russia

Для цитирования: Короткова, Е. В., Котюсов, А. И., Кунникова, К. И., Ус, П. К., Леушина, Ю. Е., Львова, О. А. (2024). Роль магнитно-резонансной томографии в изучении нейрофизиологических коррелятов исполнительных функций у детей. *Lurian Journal*, 5(2), 8–37. doi: 10.15826/Lurian.2024.5.2.1

To cite this article: Korotkova, E. V., Kotyusov, A. I., Kunnikova, K. I., Us, P. K., Leushina, Yu. E., Lvova, O. A. (2024). The Role of Magnetic Resonance Tomography in the Study of Neurophysiological Correlates of Executive Function in Children. *Lurian Journal*, 5(2), 8–37. doi: 10.15826/Lurian.2024.5.2.1

Аннотация. Исполнительные функции — совокупность когнитивных навыков высшего порядка, играющих важную роль в повседневном функционировании ребенка. Одним из самых доступных методов изучения структуры мозга в норме и при патологии является МРТ головного мозга. В статье рассмотрены модели и нейрофизиологические корреляты исполнительных функций, подходы к изучению исполнительных функций у детей с применением магнитно-резонансной томографии, а также основные заболевания, которые могут привести к дефицитарности исполнительных функций: синдром дефицита внимания и гиперактивности, расстройства аутистического спектра и артериальные ишемические инсульты. Основное внимание сфокусировано на анализе зарубежных подходов.

Ключевые слова: исполнительные функции; магнитно-резонансная томография; СДВГ; РАС; артериальный ишемический инсульт; когнитивное развитие; когнитивная психология

Abstract. Executive functions are a set of higher-order cognitive skills that play a vital role in the children's daily functioning. One of the most accessible methods for studying brain structure in both normal and pathological conditions is MRI of the brain. This review discusses models and neurophysiological correlates of executive functions, approaches to studying executive functions in children using magnetic resonance imaging, as well as the main conditions that can lead to executive function deficits: attention deficit hyperactivity disorder, autism spectrum disorders, and arterial ischemic strokes. The main focus of the review is on the analysis of foreign approaches.

Keywords: executive function; magnetic resonance tomography; ADHD; ASD; arterial ischemic stroke; cognitive development; cognitive psychology

Понятие и сущность исполнительных функций

Исполнительные функции играют существенную роль в повседневной жизни ребенка, тесно связаны с его академической успеваемостью и остаются в фокусе внимания психологов, неврологов и педагогов на протяжении последних нескольких десятилетий.

В настоящее время не существует общепринятого единого определения исполнительных функций (англ. *executive functions*), в то же время большинство исследователей сходятся во мнении, что они включают в себя совокупность взаимосвязанных когнитивных способностей высшего порядка (Messer, Moran, & Henry, 2019).

А. Р. Лурия был первым, кто концептуализировал термин *исполнительные функции* (García-Madruga, Gómez-Veiga, & Vila, 2016). В 1963 г. в своей работе «Мозг человека и психические процессы» автор проанализировал поведение людей, страдающих повреждениями лобных долей, и пришел к выводу, что способность успешно разрешать проблемы зависит именно от их работы (Лурия, 1963). Позднее, в 1995 г., M. D. Lezak, D. B. Howieson, D. W. Loring, H. J. Hannay, J. S. Fischer (2004) определили исполнительные функции как умственные способности, необходимые для постановки цели, планирования и реализации действий для достижения этой цели, выполнения сложных задач.

Существует смысловая разница между терминами «исполнительные/управляющие функции» и «когнитивный контроль», поскольку различные научные школы по-разному концептуализируют эти понятия. В настоящее время вопрос о том, какие исполнительные функции можно рассматривать как независимые и как именно они связаны друг с другом, остается открытым (McKenna, Rushe, & Woodcock, 2017).

Так, ряд авторов (Diamond, 2013; Lezak, 1982) рассматривают исполнительные функции как совокупность нисходящих автономных паритетных психических процессов, необходимых в тех случаях, когда необходимо сосредоточиться и обратить внимание на что-либо, а действовать автоматически либо интуитивно было бы опрометчиво, недостаточно либо невозможно. По их мнению, исполнительные функции позволяют генерировать новые идеи, обдумывать действия перед тем, как совершить их, успешно разрешать новые непредвиденные проблемы, не отвлекаться на посторонние стимулы и оставаться сосредоточенным (Diamond, 2013).

Другие ученые (например, Miller & Cohen, 2001; Posner & Snyder, 1975) рассматривают исполнительные функции как единую систему и вводят термин *когнитивный контроль* (англ. *cognitive control*), которым они обозначили способность организовывать мысли и действия в соответствии с внутренними целями. Нейробиологическая модель когнитивного контроля связывала префронтальную кору с поддержанием паттернов активности, которые предоставляют цели и средства для их достижения и обеспечивают сигналы смещения по большей части головного мозга, влияя на сенсорные модальности и системы (Miller & Cohen, 2001). Согласно данной концепции, исполнительные функции представляют собой единый конструктор, составные элементы которого не дифференцируются. Рассмотрение исполнительных функций как единой структуры критикуется некоторыми исследователями. В частности, D. T. Stuss и M. P. Alexander (2000) писали: «There is no frontal homunculus, no unitary executive function» (p. 291), предполагая, что можно дифференцировать отдельные управляющие процессы, связанные с лобными долями.

Одна из классификаций, которая развивалась в ходе исследований на протяжении многих лет, подразумевает дифференциацию исполнительных функций на «горячие» и «холодные» (*hot / cold executive functions*). «Холодные» связаны с когнитивной обработкой информации, в то время как «горячие» отвечают за обработку информации, связанную с вознаграждением, эмоциями, мотивацией (Salehinejad, Ghanavati, Rashid, & Nitsche, 2021) и необходимы для выполнения целенаправленной задачи (Zelazo & Carlson, 2012). К первым относятся когнитивное торможение, рабочая память и планирование, ко вторым — аффективное принятие решений и отсроченное вознаграждение (Poland, Monks, & Tsermentseli, 2016). Хотя считается, что «холодные» и «горячие» исполнительные функции взаимодействуют как части единой скоординированной системы, их можно разделить как с точки зрения поведения, так и с точки зрения нейроанатомии (Carlson, 2005). Согласно данной модели, исполнительные функции представляют собой спектр, все составляющие которого могут быть «горячими» или «холодными» в зависимости от контекста ситуации (Salehinejad et al., 2021).

Нейрофизиологические корреляты исполнительных функций

В когнитивных нейронауках исторически было принято считать, что ведущая роль в регуляции исполнительных функций принадлежит лобным долям, а термины «лобные функции» и «исполнительные функции» достаточно длительное время были синонимичны (Alvarez & Emory, 2006). Многие классические исследования исполнительных функций, например, случай Финеаса Гейджа (Teles Filho, 2020), были проведены на когортах пациентов с повреждениями лобных долей (как правило, в структуре черепно-мозговой травмы).

Префронтальная (в частности, дорсолатеральная префронтальная) кора является одной из наиболее поздно созревающих в рамках онтогенеза областей мозга (Casey, Giedd, & Thomas, 2000), и многие исследователи полагают, что именно она отвечает за большинство исполнительных функций в человеческом мозге (Sari & Erbas, 2022): ряд эмпирических исследований и метаанализов сообщают, что она отвечает за внимание (Vossel, Geng, & Fink, 2014), рабочую память (Eriksson, Vogel, Lansner, Bergström, & Nyberg, 2015; Joyce, Uchendu, & Arnsten, 2024), когнитивное торможение (Hertrich, Dietrich, Blum, & Ackermann, 2021).

Однако в метааналитическом обзоре (Alvarez & Emory, 2006) авторы обратили внимание, что результаты наиболее известных исследований поражений лобных долей с применением ряда когнитивных методик (Висконсинский тест на сортировку карточек, тест на вербальную беглость, словесно-цветовой тест Струпа) указывают скорее на чувствительность, а не на специфичность этих измерений по отношению к функционированию лобных долей. Другими словами, как лобные, так и другие области головного мозга необходимы для успешной реализации исполнительных

функций. Участие лобных долей в их осуществлении — необходимое, но в значительной степени недостаточное требование.

Нейрофизиологические корреляты исполнительных функций варьируются у разных авторов и определяются в зависимости от научной парадигмы.

Классическая нейропсихологическая модель А. Р. Лурия предполагает выделение трех функциональных блоков мозга, имеющих анатомические корреляты. Первый блок — энергетический — отвечает за регуляцию тонуса и бодрствования и связан со стволом мозга, промежуточным мозгом и медиальными отделами коры головного мозга. Второй блок отвечает за получение, переработку и хранение информации, поступающей из внешнего мира, морфологическим субстратом которых выступают латеральные постцентральные области неокортекса на выпуклой поверхности полушарий. Наконец, третий блок отвечает за программирование, регуляцию и контроль психической деятельности и анатомически связан с прецентральными передними отделами полушарий (Лурия, 1973).

Модель А. Р. Лурия является кортикоцентричной и оспаривается зарубежными исследователями, например, J. Peña-Casanova и J. Sigg-Alonso (2020) уделяют пристальное внимание подкорковым мозговым структурам. В то же время с главенствующей ролью префронтальной коры в управлении высшими когнитивными процессами и исполнительными функциями согласны практически все исследователи. Так, M. D. Lezak (1982) выделял префронтальную кору, некоторые компоненты лимбической системы (в частности, таламические ядра) и правое полушарие как основные структуры головного мозга, отвечающие за исполнительные функции. M. M. Sohlberg и C. A. Mateer (2001) связывали работу исполнительных функций с передней лобной и височной областями головного мозга. A. Diamond соотносит работу исполнительных функций с префронтальной корой и связанными с ней регионами (Diamond & Ling, 2016), в частности, рабочую память — с дорсолатеральной префронтальной корой (Diamond, 2013). Таким же образом A. Miyake, N. P. Friedman, M. J. Emerson, A. H. Witzki, A. Howerter, T. D. Wager (2000) в своей модели выделяют три исполнительные функции — обновление, переключение и подавление доминирующих реакций. Обновление и переключение авторы связывают с рабочей памятью, которая, в свою очередь, ассоциируется с дорсолатеральной частью префронтальной коры. При этом авторы отмечают, что суть обновления как исполнительной функции заключается в необходимом активном манипулировании релевантной информацией в рабочей памяти, а не в ее пассивном хранении. Переключение зрительного внимания может регулироваться теменными долями и средним мозгом (или же posterior network attention — задней сетью внимания), в то время как ориентированные на управление переключения могут регулироваться лобными долями, в том числе передней поясной извилиной (или anterior attention network — передней сетью внимания). В целом переключение между двумя задачами активирует лобные, теменные и затылочные области. Третью исполнительную функцию — подавление доминирующих реакций — авторы также связывают с лобными долями.

«Центральный (общий) исполнитель» в работе А. Miyake и др. (2000) не соотносится с определенной анатомической структурой. Так же и А. Baddeley (2010) в своей работе «Exploring the Central Executive» выступает с критикой попыток соотносить «центрального исполнителя» с конкретным анатомическим расположением, хотя и отмечает, что в целом его можно связать с работой лобных долей. В нейровизуализационном исследовании М. Roussel, К. Dujardin, Н. Henon, О. Godefroy (2012) это предположение подтвердилось: «центральный исполнитель» зависит от лобных долей и задних областей головного мозга.

М. Т. Vanich (2009) предложил модель каскадного контроля, согласно которой исполнительные функции включают в себя временной каскад процессов выбора, которые реализуются на отдельных промежуточных станциях в префронтальной коре. Задние области дорсолатеральной префронтальной коры отвечают за направленность внимания на процессы, имеющие отношение к текущей задаче. Средние области дорсолатеральной префронтальной коры отвечают за выбор определенных представлений или образов, имеющих отношение к текущей задаче. Задние отделы дорсальной передней поясной коры участвуют в поздних этапах выбора и чувствительны к факторам, связанным с реакцией. Наконец, передние отделы дорсальной префронтальной коры участвуют в оценке реакции. Важным аспектом теории М. Т. Vanich является то, что степень активации этих механизмов зависит от степени эффективности применения исполнительных функций на более ранних промежуточных станциях.

Модель когнитивного контроля Е. К. Miller и J. D. Cohen (2001) предполагает, что одной из важнейших особенностей системы когнитивного контроля является требование доступа к разнообразной информации как о внутреннем состоянии системы, так и о внешнем состоянии окружающей реальности. Авторы отметили, что анатомически префронтальная кора удачно расположена для выполнения этого требования. Роль префронтальной коры в осуществлении работы исполнительных функций признают D. T. Stuss и B. Levine (2002) в своей функциональной когнитивной модели лобных долей. Правая дорсолатеральная лобная область отвечает за мониторинг поведения, в то время как левая дорсолатеральная область участвует в вербальной обработке. Обе эти лобные области, а также верхняя медиальная лобная доля задействованы в задачах, требующих когнитивного переключения, в то время как нижняя медиальная лобная область опосредует некоторые аспекты тормозного контроля.

Модель hot/cold executive functions довольно часто рассматривалась в нейрофизиологических исследованиях. «Горячие» исполнительные функции связаны с орбитофронтальной корой, которая тесно связана с лимбической системой: повреждения этой области часто приводят к неприемлемому социальному и/или эмоциональному поведению (Carlson, 2005). Также они связаны с такими подкорковыми структурами, отвечающими за эмоции, как миндалевидное тело, островковая доля, полосатое тело (включая скорлупу, хвостатое ядро и прилежащее ядро), гиппокамп и ствол мозга (Salehinejad et al., 2021). В свою очередь, «холодные» исполнительные

функции связаны с латеральной префронтальной корой, включая дорсолатеральную префронтальную кору (Nejati, Salehinejad, & Nitsche, 2018).

Современные подходы к когнитивным функциям предполагают, что когнитивные процессы реализуются в результате взаимодействия различных нейрональных структур, образующих нейрональные сети (сетевой подход, параллельная распределенная обработка, функциональные системы). Например, было обнаружено, что исполнительные функции зависят от нескольких тесно связанных с префронтальной корой областей мозга и образуют более крупные исполнительные нейронные сети (Cristofori, Cohen-Zimmerman, & Grafman, 2019). В обзоре М. В. Jurado и М. Rosselli (2007) было выявлено, что исполнительные функции связаны с различными областями лобных долей и распределены по широкой мозговой сети, включающей в себя подкорковые структуры и таламические пути.

В обзоре Н. Barbas и В. Zikopoulos (2007) рассматривались нейронные сети, созданные префронтальной корой с возбуждающими и тормозными системами. Так, были рассмотрены связь префронтальной коры с височной слуховой ассоциативной корой (тормозный контроль других участков коры головного мозга), проекция префронтальной коры на тормозное таламическое ретикулярное ядро (перенаправление информации между таламусом и корой головного мозга) и связь задней орбитофронтальной коры с миндалевидным телом (ключевая роль в эмоциональных процессах). Эти исполнительные нейронные сети имеют большое значение для полноценной работы исполнительных функций.

Таким образом, префронтальная кора играет центральную, но не всеохватывающую роль в работе исполнительных функций. Другие корковые и подкорковые структуры головного мозга, в том числе связанные с префронтальной корой, и целые нейронные сети могут также влиять на их корректное функционирование.

Характеристика исполнительных функций у детей

Исполнительные функции играют ведущую роль в способности человека адаптироваться к различным ситуациями, возникающим в повседневной жизни. Также исполнительные функции у детей напрямую влияют на академическую успеваемость (Best, Miller, & Naglieri, 2011), в частности на успешное развитие навыков чтения (Meixner & Laubrock, 2024) и математических навыков (Blair & Razza, 2007; Bull & Scerif, 2001), языковые способности (Filipe, Veloso, & Frota, 2023), логическое мышление (Doebel, Rowell, & Koenig, 2016) и навыки рассуждения (Richland & Burchinal, 2013).

Исторически считалось, что исполнительные функции возникают только в позднем детстве, однако V. Anderson (2002) ссылается на ряд исследований, описывающих их последовательное развитие на протяжении всего периода детства, совпадающее с развитием лобных долей. Существует несколько точек зрения на онтогенез исполнительных функций в детском возрасте. Так, модель А. Miyake и др. (2000) предполагает, что когнитивный контроль, рабочая память и когнитивная гибкость появляются до и в течение дошкольного возраста, на основании чего N. Garon, S. E. Bryson, I. M. Smith (2008) отмечают, что когнитивный контроль

и рабочая память активно развиваются с 2–5 лет, тем самым закладывая основу для когнитивной гибкости.

Несмотря на то, что модель А. Miyake и др. (2000) широко применяется в исследованиях исполнительных функций, остается открытым вопрос о том, насколько уместно применять ее в отношении детской популяции. Несмотря на ранние доказательства, предполагающие, что у детей данные функции можно разделить на те же подтипы, результаты более поздних исследований неоднозначны, и во многих исследованиях доказательства их дифференциации на три подтипа обнаружены не были (Lee, Bull, & Ho, 2013). Исполнительные функции в детстве могут представлять собой унитарную структуру с «общим исполнителем»; в ходе взросления отдельные из них становятся все более дифференцированными как от других когнитивных функций, так и друг от друга (Goddings, Roalf, Lebel, & Tamnes, 2021).

Например, C. R. Brydges, A. M. Fox, C. L. Reid и M. Anderson (2014) обнаружили, что такая унитарная структура исполнительных функций у детей к 10–11 годам становится двухфакторной: рабочая память дифференцируется, но остается связанной с когнитивным торможением и когнитивной гибкостью. F. Laureys, S. De Waelle, M. T. Barendse, M. Lenoir, F. J. Deconinck (2022) предположили, что унитарная модель исполнительных функций у детей по достижении подросткового возраста становится четырехфакторной и включает в себя три базовые исполнительные функции (рабочая память, когнитивная гибкость и когнитивное торможение) и планирование. А. Diamond (2002) связывала унитарность исполнительных функций у детей со структурной, а также функциональной незрелостью префронтальной коры.

Нарушения исполнительных функций у детей

M. D. Lezak (1982) отмечал, что исполнительные функции лежат в основе всех общественно полезных, самосовершенствующих, конструктивных и творческих видов деятельности; их нарушение или полная утрата ставят под угрозу способность к независимой, самостоятельной и социально-продуктивной жизни.

Нарушения исполнительных функций лежат в основе психопатологии, наблюдаемой при разных психических расстройствах, и тесно связаны со многими симптомами, которые могут проявляться у детей. Так, дефицитарность исполнительных функций представлена в клинической картине синдрома дефицита внимания и гиперактивности (далее по тексту — СДВГ), расстройств аутистического спектра (далее по тексту — РАС) и депрессивных расстройств, а также биполярного аффективного расстройства, шизофрении и обсессивно-компульсивного расстройства (Hosenbocus & Chahal, 2012). Интерес к дефицитарности исполнительных функций при нарушениях нервно-психического развития обусловлен тем, что они связывают основные генетические, нейронные или экзогенные факторы с поведенческими проявлениями при психопатологии и могут выступать предикторами функциональных нарушений (Townes et al., 2023). Степень выраженности нарушений

исполнительных функций может варьировать в зависимости от окончательного диагноза и коморбидных состояний (Souissi, Chamari, & Bellaj, 2022).

Помимо этого ряд систематических обзоров и метаанализов посвящен нарушениям исполнительных функций при таких неврологических заболеваниях, как артериальный ишемический инсульт (O'Keeffe, Murphy, Ganesan, King, & Murphy, 2017; Rivella & Viterbori, 2021), мигрень (Vuralli, Ayata, & Bolay, 2018), эпилепсия (Operto et al., 2023), детский церебральный паралич (Zimonyi et al., 2024), нарколепсия (Blackwell, Alammar, Weighall, Kellar, & Nash, 2017) и инсомния (Miano & Peraito-Adrados, 2014). Нарушение исполнительных функций у детей часто сопровождается черепно-мозговые травмы (Levin & Hanten, 2005), опухоли головного мозга (Kline & Mueller, 2020) и инфекции центральной нервной системы (Carter, Neville, & Newton, 2003).

Таким образом, рассмотренные в начале статьи нейрофизиологические модели подчеркивают связь между анатомическими структурами головного мозга и исполнительными функциями. Одним из самых доступных методов изучения такой взаимосвязи является магнитно-резонансная томография.

Магнитно-резонансная томография в исследовании исполнительных функций у детей

A. Diamond завершила свою работу «Normal Development of Prefrontal Cortex from Birth to Young Adulthood: Cognitive Functions, Anatomy, and Biochemistry» (2002) предположением, что методы нейровизуализации смогут ответить на многие нерешенные вопросы, связанные с развитием префронтальной коры и исполнительных функций, работу которых она обеспечивает. В частности, магнитно-резонансная томография (далее по тексту — МРТ) представляет собой безопасный и неинвазивный метод визуализации, оптимально подходящий для изучения анатомии головного мозга (Hennig, 2023), а также широко применяемый как для клинических, так и для исследовательских целей (Yousaf, Dervenoulas, & Politis, 2018) благодаря высокой контрастности мягких тканей и возможности сканирования в трех взаимно перпендикулярных плоскостях (Sinha & Ramakrishnan, 2010). В настоящее время разработано несколько подходов к применению МРТ в исследовании исполнительных функций у детей.

Традиционно МРТ в клинической практике применяется для получения так называемых *взвешенных изображений* (*weighted images*), контрастность которых зависит от сочетания различных факторов, некоторые из них присущи структурам головного мозга, а некоторые зависят от специфики эксперимента (Pierpaoli, 2010). Такой подход также называется качественным и позволяет визуально различить состояние ткани мозга (Cashmore et al., 2021) через выявление различий в контрастности между предположительно затронутыми областями головного мозга и предположительно нормальными (Pierpaoli, 2010). С помощью методов

нейровизуализации изучаются структура белого и серого вещества, спинномозговой жидкости (Yazdani, Yusof, Riazi, & Karimian, 2014), а также непосредственно анатомические структуры головного мозга. На основе изображений не подсчитываются какие-либо количественные параметры, все диагностические заключения полностью основаны на интерпретации специалиста-рентгенолога (Cashmore et al., 2021). Однако у качественного подхода есть ряд ограничений, главное из которых — отсутствие биологической специфичности: различные физиологические и патологические субстраты могут вызывать схожие изменения в контрастности получаемого изображения (Pierpaoli, 2010).

Высокое контрастное разрешение МРТ делает ее особенно полезной для количественной оценки пространственных параметров (таких как длина, площадь и объем) анатомических структур (Boone, 2007). В последние годы набирает популярность количественный подход к визуализационным исследованиям, поскольку он позволяет выводить параметры, связанные с физическими величинами (Cashmore et al., 2021). Количественная оценка снимков МРТ предполагает определение объемов как головного мозга в целом, так и отдельных его структур. Золотым стандартом считается ручное измерение объемов, однако из-за высоких временных затрат могут применяться автоматические алгоритмы (Chalavi, Simmons, Dijkstra, Barker, & Reinders, 2012). Хотя количественная оценка сама по себе не гарантирует биологической специфичности, она представляет собой важный компонент любой метрики, являющейся потенциальным визуализационным биомаркером (Pierpaoli, 2010).

Помимо этого в клинических и исследовательских целях был разработан автоматизированный метод морфометрии на основе вокселей, который относительно прост в использовании и обеспечивает биологически правдоподобные результаты. В основе метода лежит статистическое выявление различий в анатомии головного мозга между группами субъектов (Whitwell, 2009). Это достигается благодаря пространственной нормализации всех структурных МРТ-изображений к единому стереотаксическому пространству, сегментации нормализованных изображений на белое и серое вещество, сглаживанию изображений белого и серого вещества и проведению статистического анализа для локализации существенных различий между двумя или более экспериментальными когортами (Mechelli, Price, Friston, & Ashburner, 2005).

Перспективным является поиск биомаркеров — таких биологических характеристик, которые могут быть объективно измерены как индикатор нормативных или патогенных биологических процессов или фармакологического ответа на терапевтическое воздействие. МРТ потенциально обеспечивает доступ к множеству биомаркеров количественной визуализации (Cashmore et al., 2021). Особое внимание следует обратить на возможность разработки биомаркеров для ряда психических расстройств, приводящих к нарушению исполнительных функций. Считается, что надежные прогностические нейровизуализационные биомаркеры откроют

возможности для клинических и научных исследований в области когнитивной психологии, а также позволят проводить проспективные наблюдения.

Магнитно-резонансная томография в изучении нарушений развития исполнительных функций у детей

Далее будет рассмотрено применение метода МРТ головного мозга при таких состояниях, как синдром дефицита внимания и гиперактивности, расстройства аутистического спектра, а также при артериальном ишемическом инсульте у детей, поскольку именно эти три патологии чаще всего приводят к дефицитарности исполнительных функций.

Магнитно-резонансная томография в изучении исполнительных функций при синдроме дефицита внимания и гиперактивности у детей

Диагностическое и статистическое руководство по психическим расстройствам (5-е издание) определяет СДВГ как нарушение нервно-психического развития, характеризующееся триадой симптомов: невнимательностью, импульсивностью и гиперактивностью (American Psychiatric Association, 2022), дебют которых должен состояться в возрасте до двенадцати лет (Yap, Abdul Manan, & Sharip, 2021).

Нарушение исполнительных функций в целом присуще СДВГ: большинство современных нейрокогнитивных и поведенческих моделей СДВГ делают прогнозы относительно роли исполнительной дисфункции в этиологии и патофизиологии синдрома (Kofler et al., 2024). У пациентов с СДВГ могут наблюдаться функциональные нарушения когнитивной сферы, социальной адаптации и академической успеваемости; предполагается, что многие из этих проблем обусловлены нарушениями исполнительных функций, в частности рабочей памяти (Dipnall et al., 2023).

В ряде крупных обзоров литературы исследователями были выделены основные анатомические структуры, вовлеченные в патогенез СДВГ и приводящие к дисфункции исполнительных функций. Так, K. Rubia, A. Alegria, H. Brinson (2014) обнаружили, что СДВГ характеризуется множественными функциональными и структурными аномалиями нейронных сетей за пределами классической лобно-стриарной модели, включая лобно-теменно-височную, лобно-мозжечковую и лобно-лимбическую сети. J. H. Satterfield и M. E. Dawson (1971) также предположили, что симптомы СДВГ могут быть вызваны нарушениями в системе лобно-лимбических связей. Роль нарушений дорсолатеральной и дорсомедиальной лобно-стриарной, лобно-теменной и лобно-мозжечково-нейронных сетей в опосредовании «холодных» исполнительных функций и нарушений латеральной орбитофронтальной и вентромедиальной сетей в опосредовании «горячих» исполнительных функций в патогенезе СДВГ была подчеркнута в обзоре A. Cubillo, R. Halari, A. Smith, E. Taylor, K. Rubia (2012). Наконец, L. J. Seidman, E. M. Valera, N. Makris (2005) выя-

вили, что у детей с СДВГ наблюдается снижение объемов дорсолатеральной префронтальной коры, хвостатого ядра, бледного шара, мозолистого тела и мозжечка.

Для изучения структурных коррелятов нарушений при СДВГ у детей применяется метод МРТ. Так, факторный анализ данных исследования ABCD — The Adolescent Brain Cognitive Development Study, направленного на изучение нейробиологических механизмов, лежащих в основе СДВГ, показал, что у экспериментальной когорты детей с СДВГ ($n = 10\,692$, 9–10 лет) снижение двустороннего объема каудальной передней поясной извилины было связано с невнимательностью, а снижение двустороннего объема хвостатого ядра — с гиперактивной и импульсивной симптоматикой. Более того, снижение объема левой парагиппокампальной извилины было связано с невнимательностью, гиперактивностью и импульсивностью, что может указывать на предположительную общую структурную особенность проявлений СДВГ (Reimann et al., 2024). В другом исследовании нейронных и генетических траекторий развития СДВГ на основе данных нейровизуализации, проводившемся в рамках проекта CBD (The Children School Functions and Brain Development Project), у экспериментальной когорты ($n = 487$, 6–15 лет) были выделены корреляты исполнительных функций: передняя поясная кора и средняя префронтальная кора отвечают за когнитивный контроль, правая нижняя теменная доля участвует в направленности внимания на внешние стимулы, средняя лобная и прецентральная извилины регулируют дорсальные и вентральные сети внимания, при этом играя важную роль в модуляции внешнего и внутреннего фокусов внимания (Wang, Y., 2024).

Особое внимание при изучении исполнительных функций у детей с СДВГ уделяется лобным областям головного мозга. На сегодняшний день литература по нервно-психическому развитию детей содержит данные ряда исследований с применением медицинской визуализации, подтверждающих широкое распространение аномалий в лобных областях головного мозга при СДВГ (Dipnall et al., 2023). Так, у детей с СДВГ ($n = 223$, 7–13 лет) наблюдалась задержка созревания латеральной префронтальной и височной коры головного мозга (Shaw et al., 2007). Мультимодальный анализ нейровизуализационных данных показал, что у детей с СДВГ ($n = 80$, 8–15 лет) тяжесть симптоматики была связана со сниженным объемом серого вещества в двусторонних лобных, теменных и височных долях (Wu et al., 2019). В исследовании, посвященном разработке мультимодальных нейровизуализационных коррелятов СДВГ у детей ($n = 1\,798$, 9–10 лет) на основе базы данных ADCD (Adolescents Behavior Cognitive Development) было обнаружено, что детский СДВГ связан с уменьшением объемов коры и площадей поверхности в лобной и височной доле (Lin et al., 2023). Похожие результаты были получены при метаанализе данных базы ENIGMA-ADHD (Enhanced Neuroimaging Genetics Through Meta-Analysis — Attention Deficit Hyperactivity Disorder) — у детей с СДВГ ($n = 1\,081$, 4–14 лет) наблюдалась меньшая площадь поверхности в лобной, височной и поясной коре (Hoogman et al., 2019). В одном из последних анализов данных из базы ADHD-200 у детей с СДВГ ($n = 209$, 7–14 лет) наблюдалось снижение объема

серого вещества в двусторонней верхней, средней и нижней префронтальной коре (Wang, X.-K., Wang, X.-Q., Yang, & Yuan, 2022). В. Dirlikov и коллеги (2015) в исследовании морфологии лобных долей выявили, что у детей с СДВГ ($n = 93$, 8–12 лет) по сравнению с нормотипичной когортой сопоставимого возраста ($n = 133$) наблюдалось уменьшение площади поверхности коры головного мозга, при этом площадь коррелировала с тяжестью симптоматики.

Магнитно-резонансная томография в изучении исполнительных функций при расстройствах аутистического спектра у детей

Диагностическое и статистическое руководство по психическим расстройствам (5-е издание) определяет РАС как группу нарушений нервно-психического развития, характеризующихся стойкими изменениями в общении и социальном взаимодействии, а также наличием стереотипных моделей поведения, деятельности и интересов (American Psychiatric Association, 2022). РАС характеризуются целым спектром проявлений — от выраженных нарушений в обучении и социализации до функционального аутизма (Andreou & Skrimpa, 2020).

Нарушение исполнительных функций характерно для РАС. Е. А. Demetriou с коллегами (2018) при проведении метаанализа 235 исследований отметили, что дефицитарность исполнительных функций при РАС носит выраженный характер и относительно стабильна в ходе онтогенеза, а также характеризуется гетерогенностью (Geurts, Booth, Sinzig, & Happe, 2014). При метаанализе исследований случай — контроль было выявлено, что при РАС наблюдаются нарушения когнитивной гибкости и рабочей памяти (Lai et al., 2017).

Было предложено несколько когнитивных моделей, объясняющих причины дефицитарности исполнительных функций при РАС. Наибольшую популярность приобрели модель Е/І и модель психического состояния человека.

Модель дисбаланса процессов возбуждения — торможения (модель Е/І). Была предложена J. L. Rubenstein и М. М. Merzenich (2003). Согласно модели, некоторые виды РАС обусловлены непропорционально высоким уровнем возбуждения, вызванным глутаматом, или же непропорционально слабым торможением, вызванным гамма-аминомасляной кислотой (далее по тексту — ГАМК) в нейронных сетях, которые опосредуют речь и социальное поведение.

Поскольку нейромедиаторы играют важную роль в развитии как периферической, так и центральной нервной системы, логично предположить, что нарушения глутаматергической и / или ГАМК-ергической систем могут быть вовлечены в патофизиологию РАС (Montanari, Martella, Bonsi, & Meringolo, 2022). Глутамат — возбуждающий нейромедиатор, участвующий в различных когнитивных процессах, таких как обучение и память (Géczy, 2010; Nisar et al., 2022). Помимо этого глутамат участвует в эмоциональной регуляции (Baek et al., 2024). ГАМК — тормозной нейромедиатор, который играет важную роль в психической и поведенческой регуляции (Nisar et al., 2022), а также отвечает за работу исполнительных функций (Hatoum et

al., 2023), таких как рабочая память (Marsman et al., 2017), когнитивное торможение и принятие решений (Sideraki & Drigas, 2024).

Модель Е/І неоднократно рассматривалась в обзорах литературы. Так, в одном из последних патофизиологических обзоров Н. Al Dera (2022) указал, что РАС связаны с нарушениями в ГАМК-ергической тормозной системе и сниженным синтезом глутамата, что вызывано нарушением дифференциации и миграции ГАМК-ергических нейронов в лобной и теменной долях, а также в гиппокампе и мозжечке. Авторы другого обзора также предположили, что нарушения в ГАМК-ергической системе могут привести к нарушениям обработки информации, что часто встречается при расстройствах нервно-психического развития, например РАС (Di et al., 2020). В обзоре S. Nisar и коллег (2022), посвященном роли глутамата в РАС, подчеркивается, что изменения в уровне глутамата могут привести к различным аутичным фенотипам. Наконец, в большом обзоре, посвященном нейрохимии РАС, также указывается, что изменения в ГАМК-ергической и глутаматергической системах являются потенциальными причинами нарушения нервно-психического развития (Marotta et al., 2020).

Предполагается, что снижение уровня ГАМК в лобной коре может привести к ее чрезмерной возбудимости (DeMayo et al., 2021) и выраженной дисфункции исполнительных функций, однако было проведено сравнительно небольшое число эмпирических исследований взаимосвязи между РАС, исполнительными функциями и моделью Е/І (Demetriou et al., 2018). Перечисленные далее исследования проводились с применением магнитно-резонансной спектроскопии — передового метода нейровизуализации, используемого для изучения биохимического состава исследуемой ткани (Manias & Peet, 2018).

В исследовании визуального поиска (Edmondson, Xia, McNally Keehn, Dydak, & Keehn, 2020) было обнаружено, что у детей с РАС ($n = 21$, 11.8–14.5 лет) уровень концентрации ГАМК в двусторонней зрительной коре был связан с более эффективным визуальным поиском. В другом поперечном исследовании уровня ГАМК в левой теменной доле (DeMayo et al., 2021) у детей с РАС ($n = 24$, 4–12 лет) показатель был ниже, чем у контрольной нормотипичной когорты сопоставимого возраста ($n = 35$). Однако у детей с РАС в отличие от нормотипичных детей уровень ГАМК с возрастом постепенно увеличивался и к девяти годам был сопоставим с показателями типично развивающихся сверстников. Авторы пришли к выводу, что у детей с РАС изначально был более низкий уровень ГАМК в левой теменной доле, что может объяснить наблюдаемые в детстве отклонения, которые с возрастом нивелируются. В исследовании (Hassan et al., 2013) было выявлено, что по сравнению с нормативной контрольной когортой ($n = 10$, 6.4–13.7 лет) у детей с РАС ($n = 10$, 6–14 лет) средний уровень глутамата в крови, а также в двусторонней полосатой левой извилине, левом полосатом теле, левом мозжечковом полушарии и левой лобной доле был повышен. Авторы пришли к заключению, что глутамат играет важную роль в патофизиологии РАС.

Модель психического состояния человека. Модель психического состояния человека (Theory of Mind) впервые была предложена в 1978 г. в работе D. Premack и G. Woodruff «Does the chimpanzee have a theory of mind?» (1978). Авторы концептуализировали модель как способность индивидуума приписывать как себе, так и другим внутренние состояния, которые невозможно наблюдать непосредственно, а также эмоции, мотивы и убеждения (Schwartz Offek & Segal, 2022). Модель включает в себя три основных процесса: способность представлять когнитивные и аффективные состояния, приписывать эти состояния себе и другим и, наконец, применять эти состояния так, чтобы это позволяло правильно понимать и предсказывать поведение (Abu-Akel & Shamay-Tsoory, 2011).

Модель психического состояния тесно связана с феноменом исполнительных функций. Некоторые исполнительные функции, такие как когнитивный контроль или когнитивная гибкость, необходимы для понимания того, что могут чувствовать или думать другие люди (Roca, 2016).

Гипотетически предполагается, что при РАС модель психического состояния нарушена (Kimhi, 2014), что приводит к нарушению межличностной коммуникации (Schwartz Offek & Segal, 2022), поскольку исполнительные функции являются неотъемлемой составляющей социальной компетенции у детей (Pellicano, 2013), а также к снижению академических навыков (Kimhi, 2014).

Как и многие другие когнитивные функции, модель психического состояния человека имеет локализованную нейробиологическую основу (Carrington & Bailey, 2009). Метааналитические и эмпирические данные о внутренних структурах и областях головного мозга выявили ряд областей, которые связаны с моделью психического состояния человека. Считается, что данная модель связана с работой медиальной префронтальной коры (Abu-Akel, 2003; Shamay-Tsoory, Tomer, Berger, Goldsher, & Aharon-Peretz, 2005). Помимо этого была отмечена роль верхней височной извилины (Shamay-Tsoory et al., 2005; Zilbovicius et al., 2006), височных полюсов и височно-теменного узла (Krause, Enticott, Zangen, & Fitzgerald, 2012).

А. Abu-Akel и S. Shamay-Tsoory (2011) предложили нейробиологическую модель психического состояния, включающую в себя нейроанатомические и нейрохимические уровни. В рамках модели корковые и подкорковые структуры организованы в функциональные сети, отвечающие за способность приписывать когнитивные и аффективные состояния как себе, так и другим людям. Когнитивная сеть включает в себя дорсомедиальную префронтальную кору, дорсальную переднюю поясную кору, миндалевидное тело и дорсальный стриатум, а аффективная — вентромедиальную и орбитофронтальную кору, вентральную переднюю поясную кору, миндалевидное тело и вентральный стриатум. Общее функционирование модели психического состояния зависит от целостности дофаминергических и серотонинергических систем.

Помимо этого предположение о том, что данная модель имеет нейробиологическую основу, подтверждается доказательствами нарушения модели психического

состояния у людей с РАС, что отмечается в обширном обзоре литературы по нейровизуализационным исследованиям (Carrington & Bailey, 2009).

Было проведено относительно небольшое количество эмпирических исследований модели психического состояния у детей с РАС с применением методов нейровизуализации. Все исследования были ограничены небольшим размером когорт и невозможностью проведения *post-hoc* анализа.

В исследовании нейронных коррелятов когнитивных и аффективных аспектов модели психического состояния человека (Kim et al., 2016) у детей с РАС ($n = 15$, 7–18 лет) и нормативно развивающихся детей сопоставимого возраста ($n = 14$) было обнаружено, что эти аспекты задействуют схожие области мозга (медиальную префронтальную кору и верхнюю височную извилину). Аффективные аспекты модели у детей с РАС были связаны с активацией островковой доли и прецентральной извилины, а у нормативно развивающихся детей — с активацией островковой доли и скорлупы. Также было выявлено, что большая активация медиальной префронтальной и передней поясной коры была связана с меньшей тяжестью симптоматики у пациентов с РАС. Активация передней поясной коры связана с усилением когнитивного контроля, концентрацией внимания и эмоциональной регуляции в ситуации выбора среди конкурирующих ответов. Авторы интерпретировали такую активацию как вариант компенсаторного механизма у пациентов с РАС. В другом исследовании модели психического состояния человека (Kana et al., 2015) авторы выдвинули гипотезу об атипичной активации мозга и функциональной связности у детей и подростков с РАС. Нейронными коррелятами модели являлись передняя поясная кора, средняя префронтальная кора, левый и правый височно-теменные узлы. Было обнаружено, что у детей с РАС ($n = 13$, 10–16 лет) по сравнению с нормотипичной когортой ($n = 13$, 10–15 лет) наблюдалось снижение активации в верхней лобной извилине, простирающейся до медиальной префронтальной коры, угловой извилины и предклинье, а также в мозжечке. Авторы установили, что результаты согласуются с предыдущими исследованиями, а также отметили особую роль мозжечка в социальном познании.

Магнитно-резонансная томография в изучении исполнительных функций при артериальном ишемическом инсульте у детей

Инсульты у детей можно разделить на перинатальные и педиатрические (Baldovsky & Okada, 2020). Национальный институт неврологических расстройств и инсульта определяет перинатальные ишемические инсульты как группу гетерогенных состояний, при которых происходит очаговое нарушение мозгового кровотока вследствие артериального или церебрального венозного тромбоза или эмболизации в период от 20 недель внутриутробной жизни до 28-го дня постнатальной жизни, подтвержденное методами нейровизуализации (Biswas, Mankad, Shroff, Hanagandi, & Krishnan, 2020). Инсульт, возникающий в возрасте от 28 дней до 18 лет, классифицируется как педиатрический инсульт (Ferriero et al., 2019). Некоторые исследователи объединяют перинатальные и педиатрические инсульты

в одну категорию детских инсультов (Champigny, Deotto, Westmacott, Dlamini, & Desrocher, 2020).

Одним из значимых последствий артериального ишемического инсульта является нарушение работы исполнительных функций (Bosenbark, Krivitzky, Ichord, Jastrzab, & Billinghamurst, 2018).

С. Rivella и Р. Viterbori (2021) в систематическом обзоре отметили, что в целом детям, перенесшим инсульт, присуще нарушение исполнительных функций, которое проявляется как при выполнении когнитивных методик, так и в повседневной жизни. В ряде эмпирических исследований отмечалось, что у детей, перенесших артериальный инсульт, наблюдаются нарушения рабочей памяти (Bosenbark et al., 2018; Studer et al., 2014; Westmacott, MacGregor, Askalan, & deVeber, 2009), когнитивного контроля (Bosenbark et al., 2018; Hajek et al., 2014; Li et al., 2022) и когнитивной гибкости (Westmacott et al., 2009).

Метод МРТ позволяет в первую очередь зафиксировать факт артериального ишемического инсульта и провести дифференциальную диагностику его от других очаговых поражений головного мозга, а затем количественно оценить объемные, структурные, функциональные и метаболические изменения, возникшие вследствие детского инсульта (Craig, Hilderley, Kirton, & Carlson, 2021), а также провести кортикальную морфометрию (Shinde et al., 2023). Для проведения исследований фокуса инфаркта с применением МРТ необходимо учитывать ряд факторов: характеристики когорты пациентов, коморбидные детские заболевания, применение некоторых групп медикаментов (Greene, Black, & Schlaggar, 2016).

Нарушения исполнительных функций при артериальном ишемическом инсульте у детей напрямую зависят от качественных и количественных характеристик поражения. Ретроспективное исследование когнитивных исходов коркового детского инсульта ($n = 27$, средний возраст на момент дебюта инсульта — 3.26 года, на момент нейропсихологического тестирования — 9.7 лет) показало, что большой объем поражения и его правосторонняя локализация с вовлечением лобной доли связаны с более низкими показателями рабочей памяти и скоростью обработки информации по сравнению со средними нормативными. Авторы отметили, что локализация и размер поражения, как предикторы когнитивных показателей, подчеркивают важность учета качественных и количественных характеристик очага инфаркта в клинических и терапевтических целях (Peterson, Williams, McDonald, Dlamini, & Westmacott, 2019). В другом исследовании (Jiang et al., 2021) изучались неврологические исходы у когорты детей, перенесших артериальный ишемический инсульт ($n = 288$, 2.78–14.4 года) и имеющих результаты МРТ спустя год после дебюта заболевания. Применялся протокол *dwi* (диффузионно-взвешенная визуализация), толщина среза 2–5 мм, зазор между срезами 0–1 мм. Учитывались объем поражения, латерализация, локализация и общий объем мозга. Для оценки неврологических исходов применялся опросник PSOM (The Pediatric Stroke Outcome Measure). Однофакторный анализ показал, что поражения, затрагивающие угловую извилину и крючковидный пучок или располагающиеся от коры головного мозга

до подкорковых ядер, были связаны с худшим неврологическим исходом. Большой размер поражения и более молодой возраст дебюта артериального ишемического инсульта также были связаны с неблагоприятным прогнозом. Полученные данные согласуются с результатами более ранних исследований, в том числе связывающих нарушения исполнительных функций с большим объемом поражения.

В исследовании рабочей памяти в парадигме модели A. Baddeley и G. Hitch когорты детей, перенесших односторонний артериальный ишемический инсульт ($n = 32$, 6–14 лет), по сравнению с нормативной когортой сопоставимого возраста ($n = 32$) продемонстрировала более низкие результаты по методике Working Memory Test Battery и сокращенному тесту Векслера (Fuentes, Westmacott, Deotto, deVeber, & Desrocher, 2017). Авторы отметили, что необходимы дальнейшие исследования на более крупных когортах с учетом когнитивных, психосоциальных и демографических переменных. Наконец, исследование показателей внимания и исполнительных функций с применением диффузионной визуализации у детей, перенесших артериальный ишемический инсульт и набранных из популяционной исследовательской когорты APSP (Alberta Perinatal Stroke Project), показало, что у экспериментальной когорты ($n = 26$, 13.02 ± 4.2 года) по сравнению с нормативным контролем ($n = 31$, 13.25 ± 3.6 года), а также с когортой детей, имеющих в анамнезе диагноз перивентрикулярный венозный инфаркт ($n = 26$, 11.93 ± 3.5 года), наблюдалось снижение фракционной анизотропии белого вещества лобных отделов головного мозга, связанного с показателями исполнительных функций (Larsen et al., 2022). Были получены T1-взвешенные и диффузионно-взвешенные изображения в аксиальной плоскости с применением последовательности градиентного эха и диффузионного спин-эха эхо-планарного сканирования, которые впоследствии были сегментированы с использованием статистического параметрического картирования на спинномозговую жидкость, серое и белое вещество. Авторы предположили, что количественное определение микроструктуры белого вещества может выступать релевантным биомаркером когнитивных показателей.

В поперечном исследовании (Abgottspon et al., 2022) изучались моторные навыки и исполнительные функции у детей, перенесших артериальный ишемический инсульт. Рабочая память оценивалась с помощью числовых последовательностей (Letter Number-Sequencing) и теста замены цифровых символов из шкалы интеллекта Векслера для детей / взрослых (в зависимости от возраста испытуемого), когнитивное торможение — с помощью методики Go / NoGo и словесно-цветового теста Струпа, переключение — с помощью теста прокладывания маршрута (Trail Making Test) и словесно-цветового теста из методики D-KEFS (Delis-Kaplan Executive Function System). Были получены высококачественные T1-взвешенные изображения с применением последовательности градиентного эха. Учитывались следующие показатели: размер, латерализация и локализация поражения. Экспериментальная когорта ($n = 27$, 6–23 лет) по сравнению с нормативным контролем ($n = 49$, 6–26 лет) не показала существенных различий.

Заключение

Исполнительные функции играют важную роль в повседневном функционировании ребенка, поскольку напрямую связаны со способностью адаптироваться к внешним условиям, а также непосредственно влияют на академическую успешность.

Вне зависимости от исследовательской парадигмы все авторы сходятся в том, что исполнительные функции как высшие когнитивные процессы позволяют эффективно управлять деятельностью и достигать поставленных целей. Отдельные составляющие моделей варьируются от автора к автору, однако суть остается неизменной. Одним из основных нейрофизиологических коррелятов исполнительных функций является префронтальная кора, однако могут быть вовлечены и другие анатомические структуры. Нарушение исполнительных функций чаще всего фиксируется в структуре течения и исходов тех заболеваний, которые вовлекают лобные отделы головного мозга, — СДВГ, РАС и артериальных детских инсультов.

Метод МРТ головного мозга позволяет оценить исполнительные функции у детей в спектре нормы и патологии. Именно количественная оценка данных МРТ выявляет биологические маркеры, которые играют важную роль в диагностических и исследовательских целях, могут быть рассмотрены как цель для терапевтических стратегий. При СДВГ нарушение исполнительных функций преимущественно связано с дисфункцией работы лобных долей головного мозга, при РАС — с нарушением работы глутамата и ГАМК, при инсультах — зависит от локализации и объема очага поражения.

Своевременная диагностика нарушений исполнительных функций позволяет вовремя начать терапевтическое вмешательство и избежать психологического неблагополучия ребенка в дальнейшем.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, проект № 24-18-01061.

Литература

- Лурия, А. Р. (1963). *Мозг человека и психические процессы. Т. 1: Нейропсихологические исследования*. Москва: Педагогика.
- Лурия, А. Р. (1973). *Основы нейропсихологии*. Москва: Изд-во Моск. ун-та.
- Abgottspon, S., Steiner, L., Slavova, N., Steinlin, M., Grunt, S., & Everts, R. (2022). Relationship between motor abilities and executive functions in patients after pediatric stroke. *Applied Neuropsychology: Child*, 11(4), 618–628. <https://doi.org/10.1080/21622965.2021.1919111>
- Abu-Akel, A. (2003). A neurobiological mapping of theory of mind. *Brain research. Brain research reviews*, 43(1), 29–40. [https://doi.org/10.1016/s0165-0173\(03\)00190-5](https://doi.org/10.1016/s0165-0173(03)00190-5)
- Abu-Akel, A., & Shamay-Tsoory, S. (2011). Neuroanatomical and neurochemical bases of theory of mind. *Neuropsychologia*, 49(11), 2971–2984. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2011.07.012>

- Al Dera, H. (2022). Cellular and molecular mechanisms underlying autism spectrum disorders and associated comorbidities: A pathophysiological review. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 148, 112688. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2022.112688>
- Alvarez, J. A., & Emory, E. (2006). Executive function and the frontal lobes: A meta-analytic review. *Neuropsychology Review*, 16, 17–42. <https://doi.org/10.1007/s11065-006-9002-x>
- American Psychiatric Association (2022). *Diagnostic and statistical manual of mental disorders* (5th ed., text rev.). <https://doi.org/10.1176/appi.books.9780890425787>
- Anderson, V. (2002). Executive function in children: Introduction. *Child Neuropsychology*, 8(2), 69–70. <https://doi.org/10.1076/chin.8.2.69.8725>
- Andreou, M., & Skrimpa, V. (2020). Theory of mind deficits and neurophysiological operations in autism spectrum disorders: A review. *Brain Sciences*, 10(6), 393. <https://doi.org/10.3390/brainsci10060393>
- Baddeley, A. (2010). Exploring the central executive. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 1(1), 5–28. <https://doi.org/10.1080/713755608>
- Baek, J. H., Park, H., Kang, H., Kim, R., Kang, J. S., & Kim, H. J. (2024). The role of glutamine homeostasis in emotional and cognitive functions. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(2), 1302. <https://doi.org/10.3390/ijms25021302>
- Baldovsky, M. D., & Okada, P. J. (2020). Pediatric stroke in the emergency department. *Journal of the American College of Emergency Physicians Open*, 1(6), 1578–1586. <https://doi.org/10.1002/emp2.12275>
- Banich, M. T. (2009). Executive function: The search for an integrated account. *Current Directions in Psychological Science*, 18, 89–94. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8721.2009.01615.x>
- Barbas, H., & Zikopoulos, B. (2007). The prefrontal cortex and flexible behavior. *Neuroscientist*, 13, 532–545. <https://doi.org/10.1177/1073858407301369>
- Best, J. R., Miller, P. H., & Naglieri, J. A. (2011). Relations between executive function and academic achievement from ages 5 to 17 in a large, representative national sample. *Learning and Individual Differences*, 21(4), 327–336. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2011.01.007>
- Biswas, A., Mankad, K., Shroff, M., Hanagandi, P., & Krishnan, P. (2020). Neuroimaging perspectives of perinatal arterial ischemic stroke. *Pediatric Neurology*, 113, 56–65. <https://doi.org/10.1016/j.pediatrneurol.2020.08.011>
- Blackwell, J. E., Alamm, H. A., Weighall, A. R., Kellar, I., & Nash, H. M. (2017). A systematic review of cognitive function and psychosocial well-being in school-age children with narcolepsy. *Sleep Medicine Reviews*, 34, 82–93. <https://doi.org/10.1016/j.smrv.2016.07.003>
- Blair, C., & Razza, R. P. (2007). Relating effortful control, executive function, and false belief understanding to emerging math and literacy ability in kindergarten. *Child Development*, 78, 647–663. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2007.01019.x>
- Boone, J. M. (2007). Radiological interpretation 2020: Toward quantitative image assessment. *The Medical Physics*, 34(11), 4173–4179. <https://doi.org/10.1118/1.2789501>
- Bosenbark, D. D., Krivitzky, L., Ichord, R., Jastrzab, L., & Billinghamurst, L. (2018). Attention and executive functioning profiles in children following perinatal arterial ischemic stroke. *Child Neuropsychology*, 24, 106–123. <https://doi.org/10.1080/09297049.2016.1225708>

- Brydges, C. R., Fox, A. M., Reid, C. L., & Anderson, M. (2014). The differentiation of executive functions in middle and late childhood: A longitudinal latent-variable analysis. *Intelligence*, 47, 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2014.08.010>
- Bull, R., & Scerif, G. (2001). Executive functioning as a predictor of children's mathematics ability: Inhibition, switching, and working memory. *Developmental Neuropsychology*, 19(3), 273–293. https://doi.org/10.1207/S15326942DN1903_3
- Carlson, S. M. (2005). Developmentally sensitive measures of executive function in preschool children. *Developmental Neuropsychology*, 28(2), 595–616. https://doi.org/10.1207/s15326942dn2802_3
- Carrington, S. J., & Bailey, A. J. (2009). Are there theory of mind regions in the brain? A review of the neuroimaging literature. *Human Brain Mapping*, 30(8), 2313–2335. <https://doi.org/10.1002/hbm.20671>
- Carter, J. A., Neville, B. G., & Newton, C. R. (2003). Neuro-cognitive impairment following acquired central nervous system infections in childhood: A systematic review. *Brain Research Reviews*, 43(1), 57–69. [https://doi.org/10.1016/S0165-0173\(03\)00192-9](https://doi.org/10.1016/S0165-0173(03)00192-9)
- Casey, B. J., Giedd, J. N., & Thomas, K. M. (2003). Structure and functional brain development and its relation to cognitive development. *Biological Psychology*, 54, 241–257. [https://doi.org/10.1016/S0301-0511\(00\)00058-2](https://doi.org/10.1016/S0301-0511(00)00058-2)
- Cashmore, M. T., McCann, A. J., Wastling, S. J., McGrath, C., Thornton, J., & Hall, M. G. (2021). Clinical quantitative MRI and the need for metrology. *The British Journal of Radiology*, 94(1120), 20201215. <https://doi.org/10.1259/bjr.20201215>
- Chalavi, S., Simmons, A., Dijkstra, H., Barker, G. J., & Reinders, A. A. T. S. (2012). Quantitative and qualitative assessment of structural magnetic resonance imaging data in a two-center study. *BMC Medical Imaging*, 12, 27. <https://doi.org/10.1186/1471-2342-12-27>
- Champigny, C. M., Deotto, A., Westmacott, R., Dlamini, N., & Desrocher, M. (2020). Academic outcome in pediatric ischemic stroke. *Child Neuropsychology*, 26(6), 817–833. <https://doi.org/10.1080/09297049.2020.1712346>
- Craig, B. T., Hilderley, A., Kirton, A., & Carlson, H. L. (2021). Imaging developmental and interventional plasticity following perinatal stroke. *Canadian Journal of Neurological Sciences*, 48(2), 157–171. <https://doi.org/10.1017/cjn.2020.166>
- Cristofori, I., Cohen-Zimmerman, S., & Grafman, J. (2019). Executive functions. In M. D'Esposito, J. Grafman (Eds.), *Handbook of Clinical Neurology: Vol. 163. The Frontal Lobes* (pp. 197–219). Amsterdam: Elsevier.
- Cubillo, A., Halari, R., Smith, A., Taylor, E., & Rubia, K. (2012). A review of fronto-striatal and fronto-cortical brain abnormalities in children and adults with attention deficit hyperactivity disorder (ADHD) and new evidence for dysfunction in adults with ADHD during motivation and attention. *Cortex*, 48(2), 194–215. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2011.04.007>
- DeMayo, M. M., Harris, A. D., Song, Y. J. C., Pokorski, I., Thapa, R., Patel, S., ... Guastella, A. J. (2021). Age-related parietal GABA alterations in children with autism spectrum disorder. *Autism Research*, 14(5), 859–872. <https://doi.org/10.1002/aur.2487>
- Demetriou, E. A., Lampit, A., Quintana, D. S., Naismith, S. L., Song, Y. J. C., Pye, J. E., ... Guastella, A. J. (2018). Autism spectrum disorders: a meta-analysis of executive function. *Molecular Psychiatry*, 23(5), 1198–1204. <https://doi.org/10.1038/mp.2017.75>

- Di, J., Li, J., O'Hara, B., Alberts, I., Xiong, L., Li, J., & Li, X. (2020). The role of GABAergic neural circuits in the pathogenesis of autism spectrum disorder. *International Journal of Developmental Neuroscience*, 80(2), 73–85. <https://doi.org/10.1002/jdn.10005>
- Diamond, A. (2002). Normal development of prefrontal cortex from birth to young adulthood: Cognitive functions, anatomy, and biochemistry. In D. T. Stuss & R. T. Knight (Eds.), *Principles of frontal lobe function* (pp. 466–503). Oxford University Press.
<https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780195134971.003.0029>
- Diamond, A. (2013). Executive functions. *The Annual Review of Psychology*, 64, 135–168.
<https://doi.org/10.1146/annurev-psych-113011-143750>
- Diamond, A., & Ling, S. D. (2016). Conclusions about interventions, programs, and approaches for improving executive functions that appear justified and those that, despite much hype, do not. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 18, 34–48. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2015.11.005>
- Dipnall, L., Hourani, D., Darling, S., Anderson, V., Sciberras, E., & Silk, T. J. (2023). Fronto-parietal white matter microstructure associated with working memory performance in children with ADHD. *Cortex*, 166, 243–257. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2023.03.015>
- Dirlikov, B., Shiels, R. K., Crocetti, D., Denckla, M. B., Mahone, E. M., & Mostofsky, S. H. (2015). Distinct frontal lobe morphology in girls and boys with ADHD. *NeuroImage: Clinical*, 7, 222–229. <https://doi.org/10.1016/j.nicl.2014.12.010>
- Doebel, S., Rowell, F. S., & Koenig, M. A. (2016). Young children detect and avoid logically inconsistent sources: The importance of communicative context and executive function. *Child Development*, 87(6), 1956–1970. <https://doi.org/10.1111/cdev.12563>
- Edmondson, D. A., Xia, P., McNally Keehn, R., Dydak, U., & Keehn, B. A. (2020). A magnetic resonance spectroscopy study of superior visual search abilities in children with autism spectrum disorder. *Autism Research*, 13(4), 550–562. <https://doi.org/10.1002/aur.2258>
- Eriksson, J., Vogel, E. K., Lansner, A., Bergström, F., & Nyberg, L. (2015). Neurocognitive architecture of working memory. *Neuron*, 88(1), 33–46. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2015.09.020>
- Ferriero, D. M., Fullerton, H. J., Bernard, T. J., Billinghamurst, L., Daniels, S. R., DeBaun, M. R., ... Smith, E. R. (2019). Management of stroke in neonates and children: A scientific statement from the American Heart Association / American Stroke Association. *Stroke*, 50(3), e51–e96.
<https://doi.org/10.1161/STR.0000000000000183>
- Filipe, G. M., Veloso, S. A., & Frota, S. (2023). Executive functions and language skills in preschool children: The unique contribution of verbal working memory and cognitive flexibility. *Brain Sciences*, 13(3), 470. <https://doi.org/10.3390/brainsci13030470>
- Fuentes, A., Westmacott, R., Deotto, A., Veber, G. de, & Desrocher, M. (2017). Working memory outcomes following unilateral arterial ischemic stroke in childhood. *Child Neuropsychology*, 23(7), 803–821. <https://doi.org/10.1080/09297049.2016.1205008>
- García-Madruga, J. A., Gómez-Veiga, I., & Vila, J. O. (2016). Executive functions and the improvement of thinking abilities: The Intervention in Reading Comprehension. *Frontiers in Psychology*, 7, 58. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.00058>
- Garon, N., Bryson, S. E., & Smith, I. M. (2008). Executive function in preschoolers: a review using an integrative framework. *Psychological Bulletin*, 134(1), 31–60.
<https://doi.org/10.1037/0033-2909.134.1.31>

- Géczy, J. (2010). Glutamate receptors and learning and memory. *Nature Genetics*, 42(11), 925–926. <https://doi.org/10.1038/ng1110-925>
- Geurts, H., Booth, R., Sinzig, J., & Happe, F. (2014). Neuropsychological heterogeneity in executive functioning in autism spectrum disorders. *International Journal of Developmental Disabilities*, 60(3), 155–162. <https://doi.org/10.1179/2047387714Y.0000000047>
- Goddings, A.-L., Roalf, D., Lebel, C., & Tamnes, C. K. (2021). Development of white matter microstructure and executive functions during childhood and adolescence: A review of diffusion MRI studies. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 51, 101008. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2021.101008>
- Greene, D. J., Black, K. J., & Schlaggar, B. L. (2016). Considerations for MRI study design and implementation in pediatric and clinical populations. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 18, 101–112. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2015.12.005>
- Hajek, C. A., Yeates, K. O., Anderson, V., Mackay, M., Greenham, M., Gomes, A., & Lo, W. (2014). Cognitive outcomes following arterial ischemic stroke in infants and children. *The Journal of Child Neurology*, 29(7), 887–894. <https://doi.org/10.1177/0883073813491828>
- Hassan, T. H., Abdelrahman, H. M., Abdel Fattah, N. R., El-Masry, N. M., Hashim, H. M., El-Gerby, K. M., & Abdel Fattah, N. R. (2013). Blood and brain glutamate levels in children with autistic disorder. *Research in Autism Spectrum Disorders*, 7(4), 541–548. <https://doi.org/10.1016/j.rasd.2012.12.005>
- Hatoum, A. S., Morrison, C. L., Mitchell, E. C., Lam, M., Benca-Bachman, C. E., Reineberg, A. E., ... Friedman, N. P. (2023). Genome-wide association study shows that executive functioning is influenced by GABAergic processes and is a neurocognitive genetic correlate of psychiatric disorders. *Biological Psychiatry*, 93(1), 59–70. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2022.06.034>
- Hennig, J. (2023). An evolution of low-field strength MRI. *MAGMA*, 36(3), 335–346. <https://doi.org/10.1007/s10334-023-01104-z>
- Hertrich, I., Dietrich, S., Blum, C., & Ackermann, H. (2021). The role of the dorsolateral Prefrontal cortex for speech and language processing. *Frontiers in Human Neuroscience*, 15, 645209. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2021.645209>
- Hoogman, M., Muetzel, R., Guimaraes, J. P., Shumskaya, E., Mennes, M., Zwiers, M. P., ... Franke, B. (2019). Brain imaging of the cortex in ADHD: A coordinated analysis of large-scale clinical and population-based samples. *The American Journal of Psychiatry*, 176(7), 531–542. <https://doi.org/10.1176/appi.ajp.2019.18091033>
- Hosenbocus, S., & Chahal, R. (2012). A review of executive function deficits and pharmacological management in children and adolescents. *The Journal of the Canadian Academy of Child and Adolescent Psychiatry*, 21(3), 223–229. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3413474/>
- Jiang, B., Hills, N. K., Forsyth, R., Jordan, L. C., Slim, M., Pavlakis, S. G., ... VIPS Investigators. (2021). Imaging predictors of neurologic outcome after pediatric arterial ischemic stroke. *Stroke*, 52(1), 152–161. <https://doi.org/10.1161/STROKEAHA.120.030965>
- Joyce, M. K. P., Uchendu, S., & Arnsten, A. F. T. (2024). Stress and inflammation target dorsolateral prefrontal cortex function: Neural mechanisms underlying weakened cognitive control. *Biological Psychiatry*, S0006–3223(24)01420–3. Advance online publication. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2024.06.016>

- Jurado, M. B., & Rosselli, M. (2007). The elusive nature of executive functions: A review of our current understanding. *Neuropsychology Review*, 17, 213–233. <https://doi.org/10.1007/s11065-007-9040-z>
- Kana, R. K., Maximo, J. O., Williams, D. L., Keller, T. A., Schipul, S. E., Cherkassky, V. L., ... Just, M. A. (2015). Aberrant functioning of the theory-of-mind network in children and adolescents with autism. *Molecular Autism*, 6(1), 59. <https://doi.org/10.1186/s13229-015-0052-x>
- Kim, E., Kyeong, S., Cheon, K. A., Park, B., Oh, M. K., Chun, J. W., ... Song, D. H. (2016). Neural responses to affective and cognitive theory of mind in children and adolescents with autism spectrum disorder. *Neuroscience Letters*, 621, 117–125. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2016.04.026>
- Kimhi, Y. (2014). Theory of mind abilities and deficits in autism spectrum disorders. *Topics in Language Disorders*, 34(4), 329–343. <https://doi.org/10.1097/TLD.0000000000000033>
- Kline, C. N., & Mueller, S. (2020). Neurocognitive outcomes in children with brain tumors. *Seminars in Neurology*, 40(3), 315–321. <https://doi.org/10.1055/s-0040-1708867>
- Kofler, M. J., Groves, N. B., Chan, E. S. M., Marsh, C. L., Cole, A. M., Gaye, F., ... Singh, L. J. (2024). Working memory and inhibitory control deficits in children with ADHD: An experimental evaluation of competing model predictions. *Frontiers in Psychiatry*, 15, 1277583. <https://doi.org/10.3389/fpsy.2024.1277583>
- Krause, L., Enticott, P. G., Zangen, A., & Fitzgerald, P. B. (2012). The role of medial prefrontal cortex in theory of mind: A deep rTMS study. *Behavioural Brain Research*, 228(1), 87–90. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2011.11.037>
- Lai, C. L. E., Lau, Z., Lui, S. S. Y., Lok, E., Tam, V., Chan, Q., ... Cheung, E. F. C. (2017). Meta-analysis of neuropsychological measures of executive functioning in children and adolescents with high-functioning autism spectrum disorder. *Autism Research*, 10(5), 911–939. <https://doi.org/10.1002/aur.1723>
- Larsen, N., Craig, B. T., Hilderley, A. J., Virani, S., Murias, K., Brooks, B. L., ... Carlson, H. L. (2022). Frontal interhemispheric structural connectivity, attention, and executive function in children with perinatal stroke. *Brain and Behavior*, 12(1), e2433. <https://doi.org/10.1002/brb3.2433>
- Laureys, F., De Waelle, S., Barendse, M. T., Lenoir, M., & Deconinck, F. J. (2022). The factor structure of executive function in childhood and adolescence. *Intelligence*, 90, 101600. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2021.101600>
- Lee, K., Bull, R., & Ho, R. M. (2013). Developmental changes in executive functioning. *Child Development*, 84(6), 1933–1953. <https://doi.org/10.1111/cdev.12096>
- Levin, H. S., & Hanten, G. (2005). Executive functions after traumatic brain injury in children. *Pediatric Neurology*, 33(2), 79–93. <https://doi.org/10.1016/j.pediatrneurol.2005.02.002>
- Lezak, M. D. (1982). The problem of assessing executive functions. *The International Journal of Psychology*, 17(1–4), 281–297. <https://doi.org/10.1080/00207598208247445>
- Lezak, M. D., Howieson, D. B., Loring, D. W., Hannay, H. J., & Fischer, J. S. (2004). *Neuropsychological Assessment* (4th ed.). Oxford: Oxford University Press.
Retrieved from <https://psycnet.apa.org/record/2004-16637-000>
- Li, E., Smithson, L., Khan, M., Kirton, A., Pei, J., Andersen, J., ... Rasmussen, C. (2022). Effects of perinatal stroke on executive functioning and mathematics performance in children. *The Journal of Child Neurology*, 37(2), 133–140. <https://doi.org/10.1177/08830738211063683>

- Lin, H., Haider, S. P., Kaltenhauser, S., Mozayan, A., Malhotra, A., Constable, R. T., ... Payabvash, S. (2023). Population level multimodal neuroimaging correlates of attention-deficit hyperactivity disorder among children. *Frontiers in Neuroscience*, 17, 1138670. <https://doi.org/10.3389/fnins.2023.1138670>
- Manias, K. A., & Peet, A. (2018). What is MR spectroscopy? *Archives of Disease in Childhood*, 103(4), 213–216. <https://doi.org/10.1136/archdischild-2017-312839>
- Marotta, R., Risoleo, M. C., Messina, G., Parisi, L., Carotenuto, M., Vetri, L., & Roccella, M. (2020). The neurochemistry of autism. *Brain Sciences*, 10(3), 163. <https://doi.org/10.3390/brainsci10030163>
- Marsman, A., Mandl, R. C. W., Klomp, D. W. J., Cahn, W., Kahn, R. S., Luijten, P. R., & Hulshoff Pol, H. E. (2017). Intelligence and brain efficiency: Investigating the association between working memory performance, glutamate, and GABA. *Frontiers in Psychiatry*, 8, 154. <https://doi.org/10.3389/fpsyt.2017.00154>
- McKenna, R., Rushe, T., & Woodcock, K. A. (2017). Informing the structure of executive function in children: A meta-analysis of functional neuroimaging data. *Frontiers in Human Neuroscience*, 11, 154. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2017.00154>
- Mechelli, A., Price, C. J., Friston, K. J., & Ashburner, J. (2005). Voxel-Based Morphometry of the human brain: Methods and applications. *Current Medical Imaging*, 1(2), 105–113. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/280225408_Voxel-Based_Morphometry_of_the_Human_Brain_Methods_and_Applications
- Meixner, J. M., & Laubrock, J. (2024). Executive functioning predicts development of reading skill and perceptual span seven years later. *Journal of Memory and Language*, 136, 104511. <https://doi.org/10.1016/j.jml.2024.104511>
- Messer, D. J., Moran, A., & Henry, A. L. (2019). Executive functioning in children. In S. D. A. Hupp, J. D. Jewell (Eds.), *The Encyclopedia of Child and Adolescent Development* (pp. 1–12). Hoboken: Wiley-Blackwell. <https://doi.org/10.1002/9781119171492.wecad117>
- Miano, S., & Peraito-Adrados, M. R. (2014). Pediatric insomnia: Clinical, diagnosis, and treatment. *Revista de Neurología*, 58(1), 35–42. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/259349704_Pediatric_insomnia_Clinical_diagnosis_and_treatment
- Miller, E. K., & Cohen, J. D. (2001). An integrative theory of prefrontal cortex function. *Annual Review of Neuroscience*, 24(1), 167–202. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.24.1.167>
- Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., Howerter, A., & Wager, T. D. (2000). The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex “Frontal Lobe” Tasks: A latent variable analysis. *Cognitive Psychology*, 41(1), 49–100. <https://doi.org/10.1006/cogp.1999.0734>
- Montanari, M., Martella, G., Bonsi, P., & Meringolo, M. (2022). Autism spectrum disorder: Focus on glutamatergic neurotransmission. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(7), 3861. <https://doi.org/10.3390/ijms23073861>
- Nejati, V., Salehinejad, M. A., & Nitsche, M. A. (2018). Interaction of the left dorsolateral prefrontal cortex (l-DLPFC) and right orbitofrontal cortex (OFC) in hot and cold executive functions: Evidence from transcranial direct current stimulation (tDCS). *Neuroscience*, 369, 109–123. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2017.10.042>

- Nisar, S., Bhat, A. A., Masoodi, T., Hashem, S., Akhtar, S., Ali, T. A., ... Haris, M. (2022). Genetics of glutamate and its receptors in autism spectrum disorder. *Molecular Psychiatry*, 27(5), 2380–2392. <https://doi.org/10.1038/s41380-022-01506-w>
- O’Keeffe, F., Murphy, O., Ganesan, V., King, J., & Murphy, T. (2017). Neuropsychological outcome following childhood stroke — a review. *Brain Injury*, 37(12), 1575–1589. <https://doi.org/10.1080/02699052.2017.1332782>
- Operto, F. F., Pastorino, G. M. G., Viggiano, A., Dell’Isola, G. B., Dini, G., Verrotti, A., Coppola, G. (2023). Epilepsy and cognitive impairment in childhood and adolescence: A mini-review. *Current Neuropsychopharmacology*, 21(8), 1646–1665. <https://doi.org/10.2174/1570159x20666220706102708>
- Pellicano, E. (2013). Testing the predictive power of cognitive atypicalities in autistic children: Evidence from a 3-year follow-up study. *Autism Research*, 6(4), 258–267. <https://doi.org/10.1002/aur.1286>
- Peña-Casanova, J., & Sigg-Alonso, J. (2020). Functional systems and brain functional units beyond Luria, with Luria: Anatomical aspects. *Lurian Journal*, 1(1), 48–76. <https://doi.org/10.15826/Lurian.2020.1.1.6>
- Peterson, R. K., Williams, T. S., McDonald, K. P., Dlamini, N., & Westmacott, R. (2019). Cognitive and academic outcomes following childhood cortical stroke. *The Journal of Child Neurology*, 34(14), 897–906. <https://doi.org/10.1177/0883073819866609>
- Pierpaoli, C. (2010). Quantitative brain MRI. *Topics in Magnetic Resonance Imaging*, 21(2), 63. <https://doi.org/10.1097/RMR.0b013e31821e56f8>
- Poland, S. E., Monks, C. P., & Tsermentseli, S. (2016). Cool and hot executive function as predictors of aggression in early childhood: Differentiating between the function and form of aggression. *British Journal of Developmental Psychology*, 34(2), 181–197. <https://doi.org/10.1111/bjdp.12122>
- Posner, M. I., & Snyder, C. R. R. (1975). Attention and cognitive control. R. L. Solso (Ed.), *Information Processing and Cognition: The Loyola Symposium* (pp. 55–85). Lawrence Erlbaum. Retrieved from <https://psycnet.apa.org/record/2005-07323-012>
- Premack, D., & Woodruff, G. (1978). Does the chimpanzee have a theory of mind? *Behavioral and Brain Sciences*, 1(4), 515–526. <https://doi.org/10.1017/S0140525X00076512>
- Reimann, G. E., Jeong, H. J., Durham, E. L., Archer, C., Moore, T. M., Berhe, F., ... Kaczurkin, A. N. (2024). Gray matter volume associations in youth with ADHD features of inattention and hyperactivity / impulsivity. *Human Brain Mapping*, 45(5), e26589. <https://doi.org/10.1002/hbm.26589>
- Richland, L. E., & Burchinal, M. R. (2013). Early executive function predicts reasoning development. *Psychological Science*, 24(1), 87–92. <https://doi.org/10.1177/0956797612450883>
- Rivella, C., & Viterbori, P. (2021). Executive function following pediatric stroke. A systematic review. *Child Neuropsychology*, 27(2), 209–231. <https://doi.org/10.1080/09297049.2020.1820472>
- Roca, M. (2016). The relationship between Executive Functions and Theory of Mind: A Long and Winding Road. *The Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 87(3), 229. <https://doi.org/10.1136/jnnp-2015-312568>
- Roussel, M., Dujardin, K., Henon, H., & Godefroy, O. (2012). Is the frontal dysexecutive syndrome due to a working memory deficit? Evidence from patients with stroke. *Brain*, 135(7), 2192–2201. <https://doi.org/10.1093/brain/aws132>

- Rubenstein, J. L., & Merzenich, M. M. (2003). Model of autism: Increased ratio of excitation / inhibition in key neural systems. *Genes, Brain and Behavior*, 2(5), 255–267.
<https://doi.org/10.1034/j.1601-183x.2003.00037.x>
- Rubia, K., Alegria, A., & Brinson, H. (2014). Imaging the ADHD brain: Disorder-specificity, medication effects and clinical translation. *Expert Review of Neurotherapeutics*, 14(5), 519–538.
<https://doi.org/10.1586/14737175.2014.907526>
- Salehinejad, M. A., Ghanavati, E., Rashid, M. H. A., & Nitsche, M. A. (2021). Hot and cold executive functions in the brain: A prefrontal-cingular network. *Brain and Neuroscience Advances*, 5.
<https://doi.org/10.1177/23982128211007769>
- Sari, E., & Erbas, O. (2022). Human prefrontal cortex: Regions and functions. *Journal of Experimental and Basic Medical Sciences*, 3(2), 134–139. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/363487909_Human_Prefrontal_Cortex_Regions_and_Functions
- Satterfield, J. H., & Dawson, M. E. (1971). Electrodermal correlates of hyperactivity in children. *Psychophysiology*, 8(2), 191–197. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1971.tb00450.x>
- Schwartz Offek, E., & Segal, O. (2022). Comparing Theory of mind development in children with autism spectrum disorder, developmental language disorder, and typical development. *Neuropsychiatric Disease and Treatment*, 18, 2349–2359. <https://doi.org/10.2147/NDT.S331988>
- Seidman, L. J., Valera, E. M., & Makris, N. (2005). Structural brain imaging of attention-deficit / hyperactivity disorder. *Biological Psychiatry*, 57(11), 1263–1272.
<https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2004.11.019>
- Shamay-Tsoory, S. G., Tomer, R., Berger, B. D., Goldsher, D., & Aharon-Peretz, J. (2005). Impaired “Affective Theory of Mind” is associated with right ventromedial prefrontal damage. *Cognitive and Behavioral Neurology*, 18(1), 55–67. <https://doi.org/10.1097/01.wnn.0000152228.90129.99>
- Shaw, P., Eckstrand, K., Sharp, W., Blumenthal, J., Lerch, J. P., Greenstein, D., ... Rapoport, J. L. (2007). Attention-deficit / hyperactivity disorder is characterized by a delay in cortical maturation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(49), 19649–19654. <https://doi.org/10.1073/pnas.0707741104>
- Shinde, K., Craig, B. T., Hassett, J., Dlamini, N., Brooks, B. L., Kirton, A., & Carlson, H. L. (2023). Alterations in cortical morphometry of the contralesional hemisphere in children, adolescents, and young adults with perinatal stroke. *Scientific Reports*, 13(1), 11391.
<https://doi.org/10.1038/s41598-023-38185-8>
- Sideraki, A., & Drigas, A. (2024). GABA and executive functions in ASD. *Scientific Electronic Archives*, 17(3). <https://doi.org/10.36560/17320241940>
- Sinha, N., & Ramakrishnan, A. G. (2010). Quality assessment in magnetic resonance images. *Critical Reviews in Biomedical Engineering*, 38(2), 127–141.
<https://doi.org/10.1615/critrevbiomedeng.v38.i2.20>
- Sohlberg, M. M., & Mateer, C. A. (2001). *Cognitive rehabilitation: An integrative neuropsychological approach*. New York, NY: Guilford Press.
- Souissi, S., Chamari, K., & Bellaj, T. (2022). Assessment of executive functions in school-aged children: A narrative review. *Frontiers in Psychology*, 13, 991699. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.991699>

- Studer, M., Boltshauser, E., Capone Mori, A., Datta, A., Fluss, J., Mercati, D., ... Steinlin, M. (2014). Factors affecting cognitive outcome in early pediatric stroke. *Neurology*, 82(9), 784–792. <https://doi.org/10.1212/WNL.0000000000000162>
- Stuss, D. T., & Alexander, M. P. (2000). Executive functions and the frontal lobes: A conceptual view. *Philosophical Research*, 63, 289–298. <https://doi.org/10.1007/S004269900007>
- Stuss, D. T., & Levine, B. (2002). Adult clinical neuropsychology: Lessons from studies of the frontal lobes. *Annual Review of Psychology*, 53, 401–433. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.53.100901.135220>
- Teles Filho, R. V. (2020). Phineas Gage's great legacy. *Dementia & Neuropsychologia*, 14(4), 419–421. <https://doi.org/10.1590/1980-57642020dn14-040013>
- Townes, P., Liu, C., Panesar, P., Devoe, D., Lee, S. Y., Taylor, G., ... Schachar, R. (2023). Do ASD and ADHD have distinct executive function deficits? A systematic review and meta-analysis of direct comparison studies. *Journal of Attention Disorders*, 27(14), 1571–1582. <https://doi.org/10.1177/10870547231190494>
- Vossel, S., Geng, J. J., & Fink, G. R. (2014). Dorsal and ventral attention systems: Distinct neural circuits but collaborative roles. *The Neuroscientist*, 20(2), 150–159. <https://doi.org/10.1177/1073858413494269>
- Vuralli, D., Ayata, C., & Bolay, H. (2018). Cognitive dysfunction and migraine. *The Journal of Headache and Pain*, 19, 109. <https://doi.org/10.1186/s10194-018-0933-4>
- Wang, X.-K., Wang, X.-Q., Yang, X., & Yuan, L.-X. (2022). Gray matter network associated with attention in children with attention deficit hyperactivity disorder. *Frontiers in Neuroscience*, 13, 922720. <https://doi.org/10.3389/fpsy.2022.922720>
- Wang, Y., Ma, L., Wang, J., Ding, Y., Liu, N., Men, W., ... Tao, S. (2024). The neural and genetic underpinnings of different developmental trajectories of Attention-Deficit / Hyperactivity Symptoms in children and adolescents. *BMC Medicine*, 22, 223. <https://doi.org/10.1186/s12916-024-03449-1>
- Westmacott, R., MacGregor, D., Askalan, R., & Veber, G. de (2009). Late emergence of cognitive deficits after unilateral neonatal stroke. *Stroke*, 40(6), 2012–2019. <https://doi.org/10.1161/STROKEAHA.108.533976>
- Whitwell, J. L. (2009). Voxel-based morphometry: An automated technique for assessing structural changes in the brain. *Journal of Neuroscience*, 29(31), 9661–9664. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2160-09.2009>
- Wu, Z.-M., Llera, A., Hoogman, M., Cao, Q.-J., Zwiers, M. P., Bralten, J., ... Wang, Y.-F. (2019). Linked anatomical and functional brain alterations in children with attention-deficit / hyperactivity disorder. *NeuroImage: Clinical*, 23, 101851. <https://doi.org/10.1016/j.nicl.2019.101851>
- Yap, K. H., Abdul Manan, H., & Sharip, S. (2021). Heterogeneity in brain functional changes of cognitive processing in ADHD across age: A systematic review of task-based fMRI studies. *Behavioural Brain Research*, 397, 112888. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2020.112888>
- Yazdani, S., Yusof, R., Riaz, A., & Karimian, A. (2014). Magnetic resonance image tissue classification using an automatic method. *Diagnostic Pathology*, 9, 207. <https://doi.org/10.1186/s13000-014-0207-7>
- Yousaf, T., Dervenoulas, G., & Politis, M. (2018). Advances in MRI Methodology. *International Review of Neurobiology*, 141, 31–76. <https://doi.org/10.1016/bs.irn.2018.08.008>

- Zelazo, Ph. D., & Carlson, S. M. (2012). Hot and cool executive function in childhood and adolescence: Development and plasticity. *Child Development Perspectives*, 6(4), 354–360.
<https://doi.org/10.1111/j.1750-8606.2012.00246.x>
- Zilbovicius, M., Meresse, I., Chabane, N., Brunelle, F., Samson, Y., & Boddaert, N. (2006). Autism, the superior temporal sulcus and social perception. *Trends in Neurosciences*, 29(7), 359–366.
<https://doi.org/10.1016/j.tins.2006.06.004>
- Zimonyi, N., Kóti, T., Dombrádi, V., Imrei, M., Nagy, R., Pulay, M. Á., ... Túri, I. (2024). Comparison of executive function skills between patients with cerebral palsy and typically developing populations: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Clinical Medicine*, 13(7), 1867.
<https://doi.org/10.3390/jcm13071867>

Оригинал статьи получен 23 июля 2024

Исправленная статья принята 02 сентября 2024

Об авторах:

Короткова Екатерина Владимировна, аспирант, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия;
<https://orcid.org/0000-0001-8601-3192>; evkmob@gmail.com

Котюсов Александр Игоревич, кандидат психологических наук, заведующий лабораторией, учебно-научная лаборатория нейротехнологий, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия;
<http://orcid.org/0000-0001-7007-824X>; sunalexr@gmail.com

Кунникова Ксения Игоревна, кандидат психологических наук, научный сотрудник, учебно-научная лаборатория нейротехнологий, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия;
<https://orcid.org/0000-0002-9595-0599>; k.i.kunnikova@urfu.ru

Ус Полина Константиновна, лаборант-исследователь, учебно-научная лаборатория нейротехнологий, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия; <https://orcid.org/0009-0003-9852-9016>; us123polina@gmail.com

Леушина Юлия Евгеньевна, студент, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия;
<https://orcid.org/0009-0002-3370-5376>; leushyuliya1975@gmail.com

Львова Ольга Александровна, доктор медицинских наук, доцент, ведущий научный сотрудник, учебно-научная лаборатория нейротехнологий, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина; старший научный сотрудник, лаборатория нейрокогнитивных технологий и нейропсихологического развития, Уральский государственный медицинский университет, Екатеринбург, Россия;
<https://orcid.org/0000-0002-2280-3096>; olvova@bk.ru

About the authors:

Korotkova Ekaterina V., Postgraduate Student, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia;

<https://orcid.org/0000-0001-8601-3192>; evkmob@gmail.com

Kotlyusov Alexander I., PhD in Psychology, Head of the Laboratory, Laboratory of Neurotechnology, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia; <http://orcid.org/0000-0001-7007-824X>; sunalexr@gmail.com

Kunnikova Ksenia I., PhD in Psychology, Researcher, Laboratory of Neurotechnology, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia;

<https://orcid.org/0000-0002-9595-0599>; k.i.kunnikova@urfu.ru

Us Polina K., Laboratory Research Assistant, Laboratory of Neurotechnology, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia;

<https://orcid.org/0009-0003-9852-9016>; us123polina@gmail.com

Leushina Yuliya E., Student, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia; <https://orcid.org/0009-0002-3370-5376>;

leushyuliya1975@gmail.com

Lvova Olga A., Doctor in Medicine, Associate Professor, Leading Researcher, Laboratory of Neurotechnology, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin; Senior Researcher, Laboratory of Neurocognitive Technologies and Neuropsychological Development, Ural State Medical University, Yekaterinburg, Russia;

<https://orcid.org/0000-0002-2280-3096>; olvova@bk.ru