

УДК 159.9

DOI: 10.33910/2687-0223-2019-1-4-330-337

Исполнительные функции в раннем детстве. Обзор иностранных источников

Е. И. Николаева ^{✉1,2}

¹ Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена,
191186, Россия, Санкт-Петербург, наб. реки Мойки, д. 48

² Елецкий государственный университет им. И. А. Бунина, 399770, Россия, г. Елец, ул. Коммунаров, д. 28

Сведения об авторе

Елена Ивановна Николаева, SPIN-код: 4312-0718, Scopus AuthorID: 7102412673, ORCID: 0000-0001-8363-8496,
e-mail: klemtina@yandex.ru

Для цитирования: Николаева, Е. И. (2019) Исполнительные функции в раннем детстве. Обзор иностранных источников. *Комплексные исследования детства*, т. 1, № 4, с. 330–337. DOI: 10.33910/2687-0223-2019-1-4-330-337

Получена 28 ноября 2019; **принята** 28 ноября 2019.

Права: © Автор (2019). Опубликовано Российским государственным педагогическим университетом им. А. И. Герцена. Открытый доступ на условиях лицензии CC BY-NC 4.0.

Executive functions in early childhood. A review of foreign sources

E. I. Nikolaeva ^{✉1,2}

¹ Herzen State Pedagogical University of Russia, 48 Moika River Emb., Saint Petersburg 191186, Russia

² Bunin Yelets State University, 28 Kommunarov Str., Yelets 399770, Russia

Author

Elena I. Nikolaeva, SPIN: 4312-0718, Scopus AuthorID: 7102412673, ORCID: 0000-0001-8363-8496,
e-mail: klemtina@yandex.ru

For citation: Nikolaeva, E. I. (2019) Executive functions in early childhood. A review of foreign sources. *Comprehensive Child Studies*, vol. 1, no. 4, pp. 330–337. DOI: 10.33910/2687-0223-2019-1-4-330-337

Received 28 November 2019; **accepted** 28 November 2019.

Copyright: © The Author (2019). Published by Herzen State Pedagogical University of Russia.
Open access under CC BY-NC License 4.0.

Исполнительные функции — это комплекс регуляторных процессов, связанных с целенаправленным управлением изменением поведения (Luna, Marek, Larsen et al. 2015). Это процессы самого высокого порядка регуляции, которые включают контроль внимания и адекватные ответы на стимулы, устойчивость к интерференции и отсроченному подкреплению (Diamond 2013). В английском переводе этот термин звучит как *executive functions*. Сейчас принято называть их исполнительными функциями, но когда их описывал А. Р. Лурия (Luria 1961; Nikolaeva 2015) в связи с анализом работы

лобных долей, то называл их регуляторными функциями. Это различие обусловлено в том числе и культурной традицией: в русском языке тот, кто руководит, — не исполняет. А тот, кто исполняет, — не руководит. В американской традиции руководитель в значительной мере исполняет собственные управленческие решения.

Считается, что исполнительные функции появляются в детстве, и их исполнение ухудшается в процессе старения (Fiske, Holmboe 2019).

Один из важнейших вопросов, встающих при анализе исполнительных функций, — насколько рано они формируются? Ответ на этот вопрос

в значительной мере может предопределить специфику образовательного процесса дома и в дошкольном учреждении. Считается, что от эффективности этих функций зависят академические достижения в школе (Blair et al. 2007; Eisenberg et al. 2009), социальной жизни. Напротив, при серьезных заболеваниях — аутизме и синдроме дефицита внимания и гиперактивности — наблюдается их ухудшение (Rommelse, Geurts, Franke et al. 2011).

Большинством исследователей достигнут консенсус, что исполнительные функции включают когнитивную гибкость, тормозный контроль и рабочую память (Zelazo 2015). Когнитивная гибкость представляет собой способность подходить к проблеме с разных сторон, быстро сменять стратегии при переходе от одной задачи к другой. Рабочая память является когнитивным процессом, который включает запоминание информации на разных этапах решения задачи и хранение этой информации на протяжении времени, пока задача не будет решена. Тормозный контроль представляет собой игнорирование нерелевантных стимулов, умение ждать, прекращение импульсивных действий. Все компоненты исполнительных функций действуют совместно в процессе достижения той или иной цели.

Часть исследователей делят исполнительные функции на «горячие» («hot») и «холодные» («cool») (Peterson, Welsh 2014). К горячим исполнительным функциям относят мотивированные значимые исполнительные функции. За них отвечают более вентральные и медиальные части префронтальной коры, то есть часть, связанная с мезолимбической системой подкрепления (миндалина и стриатум). Сюда относят задачи, в которых ребенку нужно отказаться от непосредственного вознаграждения сейчас и выбрать более отдаленное вознаграждение (Noël, Brevers, Bechara 2013). Горячие исполнительные функции активно включают эмоциональную регуляцию.

Холодные исполнительные функции представлены задачами, которые даются вне контекста, и при их решении в большей мере участвуют латеральные участки префронтальной коры (Bauer, Zelazo 2014). Считается, что развитие этих вариантов исполнительных функций происходит независимо, но у них есть единая цель — адаптировать поведение ребенка к тем условиям, в которых он живет (Friedman, Miyake 2017).

В одной из самых первых работ, посвященных теме раннего созревания исполнительных функций (Diamond 2002), были не столько ответы, сколько вопросы, на которые нужно было

ответить, чтобы понять, что происходит в мозге младенца в процессе развития и созревания.

Существуют разные модели, объясняющие взаимодействие компонентов исполнительных функций. Для взрослых Н. П. Фридман и А. Мийяки (Miyake, Friedman 2012) сначала была предложена модель единства-и-разнообразия (unity-yet-diversity). Позднее эти авторы заменили ее на иерархическую модель, в которой тормозный контроль был фактором, объединяющим все функции (Friedman, Miyake 2017), а каждая отдельная функция имела свой фактор. Однако исследователи, работающие с дошкольниками, полагают, что все параметры исполнительных функций более связаны в этом возрасте по сравнению с ситуацией во взрослом состоянии (Brydges, Fox, Reid, Anderson 2014; McKenna, Rushe, Woodcock 2017). Позднее метаанализ данных результатов по функциональной ядерно-магнитно-резонансной томографии (фЯМР-томографии) позволил сделать предположение о том, что по мере развития происходит существенное изменение в структуре исполнительных функций: они развиваются от более целостной их представленности в единой структуре к более дифференцированному функционированию. Это привело к возникновению модели развития в настоящее время (McKenna, Rushe, Woodcock 2017).

Очевидно, что горячие и холодные исполнительные функции работают совместно при решении реальных проблем, когда необходима осознанная, напряженная саморегуляция коры. В зависимости от задачи и включенности мотивации в большей мере работает то одна, то другая (Zelazo, Carlson 2012). Показано, что уже в трехлетнем возрасте можно обнаружить оба типа исполнительных функций (Hongwanishkul et al. 2005).

Тестирование исполнительных функций у детей до трех лет

Одна из наиболее принятых задач состоит в следующем. На дисплее компьютера ребенку предъявляют 2 коробки. На одной нарисован зеленый кролик, на другой — розовая свинка. Затем ребенку показывают карточку с зеленой свинкой или розовым кроликом. Сначала ребенка просят распределить карточку по цвету: зеленые объекты положить в коробку с зеленым объектом, розовые — с розовым. Он перетаскивает пальцем карточку по сенсорному экрану в нужную коробку. Ребенку предъявляют 5 карт с таким заданием. Затем ему предлагается сортировать предметы по форме: все кролики идут в одну коробку, все свинки — в другую.

Многие нормативно развивающиеся дети не могут поменять стратегию и продолжают распределять объекты по цвету, а не по форме. Более того, они делают это, несмотря на требование экспериментатора и понимание этих требований. Это и есть отражение разрыва между пониманием и исполнением в этом возрасте (Zelazo 2015).

Одним из первых задачу с отставленным ответом впервые предложил С. Ф. Якобсен (Jacobsen 1935) для работы с обезьянами. Существенно позднее для маленьких детей Пиаже предложил задачу А-не-Б (the A-not-B task) (Piaget 1954). И тогда, и сейчас эту задачу применяют для оценки функционального состояния префронтальной коры.

В этой задаче небольшую игрушку кладут в одну из двух коробок, расположенных перед ребенком. Он видит, как экспериментатор кладет игрушку. После небольшого отставления ребенку предлагается найти игрушку. Сначала игрушку регулярно кладут в коробку А. Когда ребенок обучается успешно находить игрушку в этой коробке, ее прячут в коробку Б. Многие дети делают ошибку, продолжая искать игрушку в коробке А, хотя видят, как экспериментатор клал ее в коробку Б. В задаче можно варьировать время отставления, что сейчас называют отдельным тестом — тестом с отставлением (Diamond 2002).

Структуры мозга, включенные в работу компонентов исполнительных функций у младенцев

Исследование мозга очень маленьких детей имеет множество ограничений, поэтому ученые чаще всего используют неинвазивные методы, которые не ограничивают ребенка в активности, но позволяют получить некоторое количество безартефактных записей. К таким методам сейчас относится функциональная инфракрасная спектроскопия (fNIRS). Применяя этот метод, удалось показать (Baird, Kagan, Gaudette et al. 2002), что в задачах, направленных на оценку эффективности рабочей памяти у 5–12-месячных младенцев, была выявлена активность дорзолатеральной префронтальной коры. Использование той же методики, но другими авторами, привело к расширению объема областей, связанных с рабочей памятью у младенцев (Wilcox, Biondi 2016). Было обнаружено, что при участии младенцев 3–12 месяцев в задачах, направленных на изучение уровня сформированности рабочей памяти, снижается активность задней височной коры и не меняется активность в зрительной коре. Возникло предположение,

что снижение активности отражает специализацию зрительной рабочей памяти во второй половине первого года жизни.

Было выявлено (Bell 2012), что успешное решение задачи А-не-Б в 8 месяцев связано с активацией фронто-париетальной коры. Уже в 3–7 лет удалось показать большой вклад латеральной префронтальной коры (Perlman, Huppert, Luna 2016). При этом точность и скорость ответов улучшались с возрастом, и на нейрональном уровне это соответствовало усилению активации дорсолатеральной префронтальной коры. Более того, чем больше было отставление, тем выше была активация латеральной префронтальной коры.

Х. Уллман с соавторами (Ullman, Almeida, Klingberg 2014) удалось доказать, что активация латеральной префронтальной коры в 6 лет является индикатором эффективности рабочей памяти в этом возрасте, но не могло предсказать будущие показатели рабочей памяти. А будущие показатели рабочей памяти коррелировали с активацией базальных ганглиев и таламуса. В работе Е. А. Кроун (Crone, Wendelken, Donohue et al. 2006) фЯМР-томография позволила доказать, что и у взрослых, и у детей в задачах, направленных на оценку объема рабочей памяти, активировалась вендролатеральная префронтальная кора, причем у детей не активировалась правая дорсолатеральная кора и билатерально верхняя париетальная кора. Е. Смит с соавторами, обследуя 4–7-летних детей (Smith, Anderson, Thurm et al. 2017), обнаружили, что правая нижняя лобная извилина и орбитофронтальная кора могли включаться в работу непространственной рабочей памяти.

Таким образом, лобная и париетальная кора идентифицированы как центральные нейрональные субстраты рабочей памяти в младенчестве. В нее включены и субкортикальные структуры (Alcauter, Lin, Smith et al. 2014; Ullman, Almeida, Klingberg 2014). При этом стоит помнить, что коннективность между лобной и париетальной корой и сеть, которую они формируют, крайне важна для развития рабочей памяти, но эти сети пока недостаточно созрели.

Тормозный контроль

Тормозный контроль представляет собой процесс прекращения или предотвращения автоматического или запрограммированного действия, чтобы изменить или перенаправить действие. Поведенческие проявления тормозного контроля обнаруживаются в конце первого года жизни (Diamond, Barnett, Thomas, Munro 2007; Garon, Bryson, Smith 2008). При этом

исследователи (Holmboe, Bonneville-Roussy, Csibra, Johnson 2018) полагают, что первые формы тормозного контроля и контроля внимания (Courage, Reynolds, Richards 2006) демонстрируются уже в 6 месяцев. Затем выполнение этих функций существенно улучшается в период младенчества и в раннем детстве (Friedman, Miyake, Robinson, Hewitt 2011; Garon, Smith, Bryson 2014). Стабильное проявление этих функций наблюдается в среднем детстве (Best, Miller 2010). Взрослого уровня тормозный контроль достигает в подростковом возрасте (van den Wildenberg, van der Molen 2004).

За тормозный контроль отвечает дорзолатеральная префронтальная кора и стриатум. И активация этой области коры уменьшается по мере развития (Durstun, Davidson, Tottenham et al. 2006).

Используя функциональную инфракрасную спектроскопию (Mehnert, Akhrif, Telkemeyer et al. 2013), исследователи сравнивали структуры, включенные в задачи Go/No-Go, у детей 4–6 лет и взрослых. Оказалось, что у взрослых активировались правые лобная и париетальная области в задаче No-Go, а у детей эта активация была и в задаче Go, и No-Go. Возможно, это свидетельствует о высоких требованиях к торможению у маленьких детей. У детей в No-Go задаче наблюдается еще большая активация по сравнению с задачей Go. Также используя функциональную инфракрасную спектроскопию, исследователи (Moriguchi, Shinohara 2019) предложили 3–4-летним детям задачу, в которой тормозный контроль сопровождался эмоциями. Это была задача «Less Is More», то есть «Меньше есть больше». Ребенок получал большее внешнее вознаграждение, если выбирал для себя меньшее вознаграждение. Была обнаружена более выраженная активация правой нижней лобной коры, когда дети пытались получить большее вознаграждение, реально выбирая меньшее.

Группа авторов (Aron, Robbins, Poldrack 2014) предположили, что когда происходит торможение моторного ответа, правая нижняя лобная кора посылает в субталамическое ядро базальных ганглиев сигнал о подавлении таламокортикального ответа и таким образом предотвращает появление моторного ответа. Многие исследователи включали в сеть «лобная кора — базальные ганглии» нижнюю правую лобную область в формировании тормозного контроля (Moriguchi, Shinohara 2019; Smith, Anderson, Thurm et al. 2017). Стоит упомянуть, что специализация правой нижней лобной извилины как ключевого субстрата тормозного контроля возникает в онтогенезе относительно поздно:

в дошкольном детстве и подростковом возрасте (Durstun, Davidson, Tottenham et al. 2006). При этом результаты противоречивы, и некоторые исследователи наблюдали активацию в левой нижней лобной извилине или билаateralно (Rubia, Smith, Taylor, Brammer 2007).

Когнитивная гибкость

Считается, что когнитивная гибкость также зависит от префронтальной коры (Miyake, Friedman 2012).

Развитие префронтальной коры

Префронтальная кора является основной структурой, предопределяющей развитие исполнительных функций (Aron, Robbins, Poldrack 2014; Perlman, Huppert, Luna 2016). При этом данная область, возникшая позднее других в эволюции, позднее и созревает в онтогенезе (практически к 20 годам) (Casey, Galvan, Hare 2005). Это созревание соответствует развитию когнитивных способностей ребенка (Bathelt, Gathercole, Butterfield, Astle 2017; Bathelt, Gathercole, Butterfield et al. 2018). Увеличение объема префронтальной коры, активный синаптогенез, разрастание дендритов, формирование связей с другими регионами коры сопровождается облегчением переработки когнитивной информации.

Увеличение числа дендритов в III слое префронтальной коры происходит между 6 и 12 месяцами жизни ребенка (Koenderink, Uylings, Mrzljak 1994), а пик синаптогенеза в средней лобной извилине приходится на 12–18 месяцы (Huttenlocher, Dabholkar 1997). Синаптогенез особенно активен в первые 10 лет жизни ребенка (Glantz, Gilmore, Hamer et al. 2007).

С помощью позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ) обнаружена активность в этой области в 6–8 месяцев, которая нарастала до 3–4 лет, тогда как в соматосенсорной коре активность обнаружена с момента рождения (Chugani, Phelps, Mazziotta 1987). М. А. Францечини с соавторами (Franceschini, Thaker, Themelis et al. 2007) с помощью функциональной инфракрасной спектроскопии обнаружил нарастание употребления кислорода в лобной области линейно с момента рождения до достижения плато примерно в 8–9 месяцев, тогда как в окципитальной, париетальной и височной коре экспоненциальный рост отмечался только в первые два с половиной месяца жизни.

Показано, что миелинизация подкорковых структур происходит ранее, чем миелинизация

префронтальной коры (Kinney, Brody, Kloman, Gilles 1988). Так, центральный тегментальный тракт полностью созревает к 9-недельному возрасту, тогда как фронтальный полюс полностью миелинизируется к 24 месяцам. С. С. Деони с соавторами (Deoni, Mercure, Blasi et al. 2011) с помощью ЯМР-томографии выявил, что мозжечок, мост и внутренняя капсула миелинизируются первыми, окципитальные и париеальные области коры — в возрасте около 4–6 месяцев, лобные и височные доли миелинизируются последними, в 6–8 месяцев. На основе гистологических исследований доказано, что лобная кора головного мозга человека является целевой областью миграции зрелых нейронов в первые несколько постнатальных месяцев. Это особенно интересно, поскольку основная миграция закончилась еще до рождения ребенка, что свидетельствует об особом пути развития этой области. Н. Санай с соавторами (Sanai, Nguyen, Ihrie et al. 2011) показали, что мигрируют не только молодые нейроны в обонятельную луковицу после рождения, но есть отдельный поток — медиальный поток миграции, который включает миграцию в вентро-медиальную префронтальную кору до 4 месяцев от момента рождения ребенка.

В свою очередь, М. Ф. Пэридес с соавторами (Paredes, James, Gil-Perotin et al. 2016) открыл более интенсивный поток миграции нейронов, который они назвали аркой. Это плотный слой молодых нейронов, примыкающих к передней стенке бокового желудочка. Многие из этих нейронов достигают префронтальной коры в ранний постнатальный период (заканчивающийся к 3 месяцам), при этом в них развиваются тормозные интернейроны.

Хотя последствия такой миграции не известны, М. Ф. Пэридес с соавторами (Paredes, James, Gil-Perotin et al. 2016) предположили, что тормозные характеристики этих новых интернейронов могут играть важную роль в ранней пластичности и созревании префронтальной коры.

Несмотря на столь активные процессы в префронтальной коре, связанные с синаптогенезом, метаболизмом, миелинизацией и миграцией, развитие коры будет продолжаться еще долго за пределами раннего детства. Исследования с помощью ЯМР-томографии показывают, что толщина коры и ее объем развиваются по траектории, соответствующей структуре перевернутой буквы «U», резко возрастая в детстве, а потом в ранней юности снижая активность (Shaw, Kabani, Lerch et al. 2008; Tamnes, Walhovd, Grydeland et al. 2013). Известно, что это снижение не начинается в префронтальной

коре до позднего подросткового возраста, тогда как другие кортикальные области демонстрируют редукцию серого вещества еще в раннем подростковом возрасте (Gogtay, Giedd, Lusk et al. 2004). Подобная перевернутая U-образная зависимость выявлена и для объема префронтальной коры на протяжении развития, что показано в исследовании Ш. Канемура с соавторами (Kanemura, Aihara, Aoki et al. 2003), которые использовали структурную ЯМР-томографию для оценки объема префронтальной коры с младенчества до подросткового возраста. Постоянное увеличение объема префронтальной коры обнаружено между 5 и 8 годами, потом выявлен резкий рост с 8 до 14 лет и снижение в ранней молодости.

Поведенческие корреляты развития префронтальной коры

Показано, что структурная интегрированность мозолистого тела и трактов белого вещества, которые связывают префронтальную область с другими регионами в младенчестве, позволяют предсказать эффективность исполнительных функций в позднем детстве (Ghasabian, Herba, Roza et al. 2013; Woodward, Clark, Pritchard et al. 2011). Выявлено сочетание (Koenderink, Uylings, Mrzljak 1994) периода интенсивного роста дендритов в дорсолатеральной области префронтальной коры с возраста 7,5 месяцев до 12 месяцев с периодом резкого улучшения выполнения задач типа А-не-Б, что сопровождается существенным улучшением исполнительных функций во второй части первого года жизни (Diamond 2002). Тормозный контроль улучшается уже после первых 6 месяцев (Holmboe, Bonneville-Roussy, Csibra, Johnson 2018). Это согласуется с данными С. С. Диони с соавторами (Deoni, Mercure, Blasi et al. 2011), которые с помощью ЯМР-томографии показали усиление миелинизации в лобных областях в возрасте с 6 до 8 месяцев у младенцев. Исследователи предположили, что миелинизация позволяет быстро синхронизировать информационную переработку, которая необходима многим когнитивным функциям, включая и исполнительные. К сожалению, для совсем маленьких детей трудно предложить задачи, соответствующие возрасту (Anderson, Reidy 2012; Holmboe, Bonneville-Roussy, Csibra, Johnson 2018).

С. К. Тэмнес с соавторами (Tamnes, Østby, Walhovd et al. 2010) применили структурную ЯМР-томографию для оценки толщины коры у детей 8–19 лет, которые выполняли задачи для оценки исполнительных функций.

Обнаружено, что независимо от возраста детей задачи, направленные на оценку когнитивной гибкости, связанные с толщиной коры в парieto-лобных областях, включая левую лобную извилину, тогда как тормозный контроль ассоциировался с окципитальными и парieto-лобными областями. В продолжение своих исследований С. К. Тэмнес с соавторами (Tamnes, Walhovd, Grydeland et al. 2013) нашли, что улучшение рабочей памяти в течение 2-летнего лонгитюда было связано с редукцией кортикального объема в латеральной префронтальной коре и задней парietoальной области. Они предположили, что структурное созревание лобно-парietoальной области прямо связано

с развитием рабочей памяти, при этом процессы миелинизации и увеличения синапсов у подростков опосредуют изменение объема и усиление специализации и эффективности переработки в лобно-парietoальной сети, что ведет к улучшению выполнения исполнительных функций в среднем детстве и подростковом периоде.

Итак, исследования последних лет расширили представление о роли префронтальной коры в формировании исполнительных функций и существенно снизили возраст детей, при котором происходит формирование исполнительных функций.

References

- Alcauter, S., Lin, W., Smith, J. K. et al. (2014) Development of thalamocortical connectivity during infancy and its cognitive correlations. *Journal of Neuroscience*, vol. 34, no. 27, pp. 9067–9075. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.0796-14.2014 (In English)
- Anderson, P. J., Reidy, N. (2012) Assessing executive function in preschoolers. *Neuropsychology Review*, vol. 22, no. 4, pp. 345–360. DOI: 10.1007/s11065-012-9220-3 (In English)
- Aron, A. R., Robbins, T. W., Poldrack, R. A. (2014) Inhibition and the right inferior frontal cortex: One decade on. *Trends in Cognitive Sciences*, vol. 18, no. 4, pp. 177–185. DOI: 10.1016/j.tics.2013.12.003 (In English)
- Baird, A. A., Kagan, J., Gaudette, T. et al. (2002) Frontal lobe activation during object permanence: Data from near-infrared spectroscopy. *NeuroImage*, vol. 16, no. 4, pp. 1120–1126. DOI: 10.1006/nimg.2002.1170 (In English)
- 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*, vol. 78, no. 2, pp. 647–663. DOI: 10.1111/j.1467-8624.2007.01019.x (In English)
- Bathelt, J., Gathercole, S. E., Butterfield, S., Astle, D. E. (2017) *The role of the structural connectome in literacy and numeracy development in children*. [Online]. Available at: <https://psyarxiv.com/jk6yb/> (accessed 12.10.2019) (In English)
- Bathelt, J., Gathercole, S. E., Butterfield, S. et al. (2018) Children's academic attainment is linked to the global organization of the white matter connectome. *Developmental Science*, vol. 21 (5), article e12662. DOI: 10.1111/desc.12662 (In English)
- Bauer, P. J., Zelazo, P. D. (2014) The national institutes of health toolbox for the assessment of neurological and behavioral function: A tool for developmental science. *Child Development Perspectives*, vol. 8, pp. 119–124. DOI: 10.1111/cdep.12080 (In English)
- Bell, M. A. (2012) A psychobiological perspective on working memory performance at 8 months of age. *Child Development*, vol. 83, no. 1, pp. 251–265. DOI: 10.1111/j.1467-8624.2011.01684.x (In English)
- Best, J. R., Miller, P. H. (2010) A developmental perspective on executive function. *Child Development*, vol. 81, no. 6, pp. 1641–1660. DOI: 10.1111/j.1467-8624.2010.01499.x (In English)
- 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*, vol. 47, pp. 34–43. DOI: 10.1016/j.intell.2014.08.010 (In English)
- Casey, B. J., Galvan, A., Hare, T. A. (2005) Changes in cerebral functional organization during cognitive development. *Current Opinion in Neurobiology*, vol. 15, no. 2, pp. 239–244. DOI: 10.1016/j.conb.2005.03.012 (In English)
- Chugani, H. T., Phelps, M. E., Mazziotta, J. C. (1987) Positron emission tomography study of human brain functional development. *Annals of Neurology*, vol. 22, no. 4, pp. 487–497. DOI: 10.1002/ana.410220408 (In English)
- Courage, M. L., Reynolds, G. D., Richards, J. E. (2006) Infants' attention to patterned stimuli: Developmental change from 3 to 12 months of age. *Child Development*, vol. 77, no. 3, pp. 680–695. DOI: 10.1111/j.1467-8624.2006.00897.x (In English)
- Crone, E. A., Wendelken, C., Donohue, S. et al. (2006) Neurocognitive development of the ability to manipulate information in working memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 103, no. 24, pp. 9315–9320. DOI: 10.1073/pnas.0510088103 (In English)
- Deoni, S. C. L., Mercure, E., Blasi, A. et al. (2011) Mapping infant brain myelination with magnetic resonance imaging. *Journal of Neuroscience*, vol. 31, no. 2, pp. 784–791. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.2106-10.2011 (In English)

- Diamond, A. (2002) Normal development of prefrontal cortex from birth to young adulthood: Cognitive functions, anatomy, and biochemistry. In: D. T. Stuss, R. Knight (eds.). *Principles of frontal lobe function*. New York: Oxford University Press, pp. 466–503. (In English)
- Diamond, A. (2013) Executive functions. *Annual Review of Psychology*, vol. 64, pp. 135–168. DOI: 10.1146/annurev-psych-113011-143750 (In English)
- Diamond, A., Barnett, W. S., Thomas, J., Munro, S. (2007) Preschool program improves cognitive control. *Science*, vol. 318, no. 5855, pp. 1387–1388. DOI: 10.1126/science.1151148 (In English)
- Durstun, S., Davidson, M. C., Tottenham, N. et al. (2006) A shift from diffuse to focal cortical activity with development. *Developmental Science*, vol. 9, no. 1, pp. 1–8. DOI: 10.1111/j.1467-7687.2005.00454.x (In English)
- Eisenberg, N., Valiente, C., Spinrad, T. L. et al. (2009) Longitudinal relations of children's effortful control, impulsivity, and negative emotionality to their externalizing, internalizing, and co-occurring behavior problems. *Developmental Psychology*, vol. 45, no. 4, pp. 988–1008. DOI: 10.1037/a0016213 (In English)
- Fiske, A., Holmboe, K. (2019) Neural substrates of early executive function development. *Developmental Review*, vol. 52, pp. 42–62. DOI: 10.1016/j.dr.2019.100866 (In English)
- Franceschini, M. A., Thaker, S., Themelis, G. et al. (2007) Assessment of infant brain development with frequency-domain near-infrared spectroscopy. *Pediatric Research*, vol. 61, no. 5, pp. 546–551. DOI: 10.1203/pdr.0b013e318045be99 (In English)
- Friedman, N. P., Miyake, A., Robinson, J. L., Hewitt, J. K. (2011) Developmental trajectories in toddlers' self-restraint predict individual differences in executive functions 14 years later: A behavioral genetic analysis. *Developmental Psychology*, vol. 47, no. 5, pp. 1410–1430. DOI: 10.1037/a0023750 (In English)
- Friedman, N. P., Miyake, A. (2017) Unity and diversity of executive functions: Individual differences as a window on cognitive structure. *Cortex*, vol. 86, pp. 186–204. DOI: 10.1016/j.cortex.2016.04.023 (In English)
- Garon, N., Bryson, S. E., Smith, I. M. (2008) Executive function in preschoolers: A review using an integrative framework. *Psychological Bulletin*, vol. 134, no. 1, pp. 31–60. DOI: 10.1037/0033-2909.134.1.31 (In English)
- Garon, N., Smith, I. M., Bryson, S. E. (2014) A novel executive function battery for preschoolers: Sensitivity to age differences. *Child Neuropsychology*, vol. 20, no. 6, pp. 713–736. DOI: 10.1080/09297049.2013.857650 (In English)
- Ghassabian, A., Herba, C. M., Roza, S. J. et al. (2013) Infant brain structures, executive function, and attention deficit/hyperactivity problems at preschool age. A prospective study. *The Journal of Child Psychology and Psychiatry*, vol. 54, no. 1, pp. 96–104. DOI: 10.1111/j.1469-7610.2012.02590.x (In English)
- Glantz, L. A., Gilmore, J. H., Hamer, R. M. et al. (2007) Synaptophysin and postsynaptic density protein 95 in the human prefrontal cortex from mid-gestation into early adulthood. *Neuroscience*, vol. 149, no. 3, pp. 582–591. DOI: 10.1016/j.neuroscience.2007.06.036 (In English)
- Gogtay, N., Giedd, J. N., Lusk, L. et al. (2004) Dynamic mapping of human cortical development during childhood through early adulthood. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 101, no. 21, pp. 8174–8179. DOI: 10.1073/pnas.0402680101 (In English)
- Hendry, A., Jones, E. J. H., Charman, T. (2016) Executive function in the first three years of life: Precursors, predictors and patterns. *Developmental Review*, vol. 42, pp. 1–33. DOI: 10.1016/j.dr.2016.06.005 (In English)
- Holmboe, K., Bonneville-Roussy, A., Csibra, G., Johnson, M. H. (2018) Longitudinal development of attention and inhibitory control during the first year of life. *Developmental Science*, vol. 21, no. 6, article e12690. DOI: 10.1111/desc.12690 (In English)
- Hongwanishkul, D., Happaney, K. R., Lee, W. S. C., Zelazo, P. D. (2005) Assessment of hot and cool executive function in young children: Age-related changes and individual differences. *Developmental Neuropsychology*, vol. 28, no. 2, pp. 617–644. DOI: 10.1207/s15326942dn2802_4 (In English)
- Huttenlocher, P. R., Dabholkar, A. S. (1997) Regional differences in synaptogenesis in human cerebral cortex. *The Journal of Comparative Neurology*, vol. 387, no. 2, pp. 167–178. DOI: 10.1002/(SICI)1096-9861(19971020)387:2<167::AID-CNE1>3.0.CO;2-Z (In English)
- Jacobsen, C. F. (1935) Functions of the frontal association area in primates. *Archives of Neurology & Psychiatry*, vol. 33, no. 3, pp. 558–569. DOI: 10.1001/archneurpsyc.1935.02250150108009 (In English)
- Kanemura, H., Aihara, M., Aoki, S. et al. (2003) Development of the prefrontal lobe in infants and children: A three-dimensional magnetic resonance volumetric study. *Brain & Development*, vol. 25, no. 3, pp. 195–199. DOI: 10.1016/S0387-7604(02)00214-0 (In English)
- Kinney, H. C., Brody, B. A., Kloman, A. S., Gilles, F. H. (1988) Sequence of central nervous system myelination in human infancy: II. Patterns of myelination in autopsied infants. *Journal of Neuropathology & Experimental Neurology*, vol. 47, no. 3, pp. 217–234. DOI: 10.1097/00005072-198805000-00003 (In English)
- Koenderink, M. J. Th., Uylings, H. B. M., Mrzljak, L. (1994) Postnatal maturation of the layer III pyramidal neurons in the human prefrontal cortex: A quantitative Golgi analysis. *Brain Research*, vol. 653, no. 1–2, pp. 173–182. DOI: 10.1016/0006-8993(94)90387-5 (In English)
- Luna, B., Marek, S., Larsen, B. et al. (2015) An integrative model of the maturation of cognitive control. *Annual Review of Neuroscience*, vol. 38, pp. 151–170. DOI: 10.1146/annurev-neuro-071714-034054 (In English)
- Luria, A. R. (1961) *The role of speech in the regulation of normal and abnormal behavior*. New York: Liveright Publishing Corporation, 148 p. (In English)

- 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*, vol. 11, article 154 DOI: 10.3389/fnhum.2017.00154 (In English)
- Mehnert, J., Akhrif, A., Telkemeyer, S. et al. (2013) Developmental changes in brain activation and functional connectivity during response inhibition in the early childhood brain. *Brain & Development*, vol. 35, no. 10, pp. 894–904. DOI: 10.1016/j.braindev.2012.11.006 (In English)
- Miyake, A., Friedman, N. P. (2012) The nature and organization of individual differences in executive functions: Four general conclusions. *Current Directions in Psychological Science*, vol. 21, no. 1, pp. 8–14. DOI: 10.1177/0963721411429458 (In English)
- Moriguchi, Y., Shinohara, I. (2019) Less is more activation: The involvement of the lateral prefrontal regions in a “less is more” task. *Developmental Neuropsychology*, vol. 44, no. 3, pp. 273–281. DOI: 10.1080/87565641.2019.1608549 (In English)
- Nikolaeva, E. I. (2015) Alexander Luria: Creator in the perspective of time. In: M. Nadin (ed.). *Anticipation: Learning from the past*. Cham: Springer, pp. 457–468. (Cognitive Systems Monographs. Vol. 25). DOI: 10.1007/978-3-319-19446-2_27 (In English)
- Noël, X., Brevers, D., Bechara, A. (2013) A neurocognitive approach to understanding the neurobiology of addiction. *Current Opinion in Neurobiology*, vol. 23, no. 4, pp. 632–638. DOI: 10.1016/j.conb.2013.01.018 (In English)
- Paredes, M. F., James, D., Gil-Perotin, S. et al. (2016) Extensive migration of young neurons into the infant human frontal lobe. *Science*, vol. 354, no. 6308, article aaf7073. DOI: 10.1126/science.aaf7073 (In English)
- Perlman, S. B., Huppert, T. J., Luna, B. (2016) Functional near-infrared spectroscopy evidence for development of prefrontal engagement in working memory in early through middle childhood. *Cerebral Cortex*, vol. 26, no. 6, pp. 2790–2799. DOI: 10.1093/cercor/bhv139 (In English)
- Peterson, E., Welsh, M. C. (2014) The development of hot and cool executive functions in childhood and adolescence: Are we getting warmer? In: S. Goldstein, J. A. Naglieri (eds.). *Handbook of executive functioning*. New York: Springer, pp. 45–65. DOI: 10.1007/978-1-4614-8106-5_4 (In English)
- Piaget, J. (1954) *The construction of reality in the child*. New York: Basic books, XIII, 386 p.
- Rommelse, N. N. J., Geurts, H. M., Franke, B. et al. (2011) A review on cognitive and brain endophenotypes that may be common in autism spectrum disorder and attention-deficit/hyperactivity disorder and facilitate the search for pleiotropic genes. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, vol. 35, no. 6, pp. 1363–1396. DOI: 10.1016/j.neubiorev.2011.02.015 (In English)
- Rubia, K., Smith, A. B., Taylor, E., Brammer, M. (2007) Linear age-correlated functional development of right inferior fronto-striato-cerebellar networks during response inhibition and anterior cingulate during error-related processes. *Human Brain Mapping*, vol. 28, no. 11, pp. 1163–1177. DOI: 10.1002/hbm.20347 (In English)
- Sanai, N., Nguyen, T., Ihrie, R. A. et al. (2011) Corridors of migrating neurons in the human brain and their decline during infancy. *Nature*, vol. 478, no. 7369, pp. 382–386. DOI: 10.1038/nature10487 (In English)
- Shaw, P., Kabani, N. J., Lerch, J. P. et al. (2008) Neurodevelopmental trajectories of the human cerebral cortex. *Journal of Neuroscience*, vol. 28, no. 14, pp. 3586–3594. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.5309-07.2008 (In English)
- Smith, E., Anderson, A., Thurm, A. et al. (2017) Prefrontal activation during executive tasks emerges over early childhood: Evidence from functional near infrared spectroscopy. *Developmental Neuropsychology*, vol. 42, no. 4, pp. 253–264. DOI: 10.1080/87565641.2017.1318391 (In English)
- Tamnes, C. K., Østby, Y., Walhovd, K. B. et al. (2010) Neuroanatomical correlates of executive functions in children and adolescents: A magnetic resonance imaging (MRI) study of cortical thickness. *Neuropsychologia*, vol. 48, no. 9, pp. 2496–2508. DOI: 10.1016/j.neuropsychologia.2010.04.024 (In English)
- Tamnes, C. K., Walhovd, K. B., Grydeland, H. et al. (2013) Longitudinal working memory development is related to structural maturation of frontal and parietal cortices. *Journal of Cognitive Neuroscience*, vol. 25, no. 10, pp. 1611–1623. DOI: 10.1162/jocn_a_00434 (In English)
- van den Wildenberg, W. P. M., van der Molen, M. W. (2004) Developmental trends in simple and selective inhibition of compatible and incompatible responses. *Journal of Experimental Child Psychology*, vol. 87, no. 3, pp. 201–220. DOI: 10.1016/j.jecp.2003.11.003 (In English)
- Wilcox, T., Biondi, M. (2016) Functional activation in the ventral object processing pathway during the first year. *Frontiers in Systems Neuroscience*, vol. 9, article 180. DOI: 10.3389/fnsys.2015.00180 (In English)
- Ullman, H., Almeida, R., Klingberg, T. (2014) Structural maturation and brain activity predict future working memory capacity during childhood development. *Journal of Neuroscience*, vol. 34, no. 5, pp. 1592–1598. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.0842-13.2014 (In English)
- Woodward, L. J., Clark, C. A. C., Pritchard, V. E. et al. (2011) Neonatal white matter abnormalities predict global executive function impairment in children born very preterm. *Developmental Neuropsychology*, vol. 36, no. 1, pp. 22–41. DOI: 10.1080/87565641.2011.540530 (In English)
- Zelazo, P. D. (2015) Executive function: Reflection, iterative reprocessing, complexity, and the developing brain. *Developmental Review*, vol. 38, pp. 55–68. DOI: 10.1016/j.dr.2015.07.001 (In English)
- Zelazo, P. D., Carlson, S. M. (2012) Hot and cool executive function in childhood and adolescence: Development and plasticity. *Child Development Perspectives*, vol. 6, no. 4, pp. 354–360. DOI: 10.1111/j.1750-8606.2012.00246.x (In English)