

УДК 612.821+612.8.02+612.66

ТОРМОЗНЫЕ ФУНКЦИИ МОЗГА И ВОЗРАСТНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ КОГНИТИВНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

© 2019 г. О. М. Разумникова^{1, 2, *}, Е. И. Николаева³

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Новосибирский государственный технический университет”, 630073, Новосибирск, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки “Научно-исследовательский институт физиологии и фундаментальной медицины”, 630117, Новосибирск, Россия

³Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена”, 191186, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: razoum@mail.ru

Поступила в редакцию 20.07.2018 г.

В обзоре рассмотрены возрастные особенности функциональной роли тормозных функций мозга в контроле селекции и запоминания информации, в обучении, управлении поведением, когнитивной гибкости и реализации креативных способностей. Тормозной контроль как способность целенаправленной селекции информации и волевой регуляции поведения развивается в период 3–6 лет вследствие формирования нейронных систем лобной коры, обеспечивающих передачу информации между префронтальными областями и специализированными для выполнения двигательных или речевых операций корковыми и подкорковыми структурами мозга. Показано, что успешное развитие тормозных функций является предиктором академической успеваемости при обучении в школе и лучших показателей физического и психического здоровья во взрослом возрасте. Ослабление тормозного контроля вследствие атрофии нейронных систем мозга при старении предлагается в качестве основного компонента когнитивного дефицита функций и потери адаптационных резервов. Вместе с этим, снижение функциональной фиксации объекта вследствие уменьшения тормозного контроля может способствовать эффективности дивергентного мышления и быть ресурсом креативности и/или предотвращения когнитивных дисфункций у пожилых людей. Рассматриваются альтернативные гипотезы организации креативного мышления с привлечением механизмов тормозных процессов: значение дефокусированного внимания, облегчающего переключение с одной идеи на другую, или взаимодействия функций систем мозга по умолчанию и исполнительной системы контроля поведения, определяющей выбор оригинального решения проблемы.

Ключевые слова: тормозной контроль, стратегии селекции информации, память, обучение, креативность, онтогенез

DOI: 10.1134/S0301179819010090

ВВЕДЕНИЕ

Изучение механизмов организации процессов активации и торможения в центральной нервной системе является актуальным направлением психофизиологии в связи с тем, что тормозной контроль, выполняя функции регуляции селекции, воспроизведения информации и организации реакции, включается в процессы постановки цели, саморегуляции, координации мышления и деятельности [3, 59, 116, 129]. С позиций онтогенеза эффективность тормозного контроля рассматривается как один из важных показателей когнитивного развития на его ранних этапах [26] и как компенсаторный ресурс мозга при старении [82]. Тормозные функции являются необходимым компонентом не только эффективного логического мышления [68] и, соответственно, результативности обучения, но и

креативности [22, 23], волевой регуляции поведения в соответствии с морально-этическими нормами или, напротив, асоциального или аддиктивного поведения [3, 105]. Широкое применение томографических и энцефалографических методов анализа активности мозга позволило выявить ряд закономерностей, лежащих в основе этого функционального разнообразия тормозных процессов.

РАЗВИТИЕ ТОРМОЗНОГО КОНТРОЛЯ

Эволюция поведения индивида или популяции в целом характеризуется усложнением поведенческих реакций и повышением разнообразия их репертуара, что необходимо для большей вероятности выживания в изменяющихся условиях

среды. Увеличение лобных долей мозга *homo sapiens* привело к возникновению принципиально нового поведения, которое запускается не внешними стимулами угрозы или любопытства, или биологической мотивацией голода, жажды или терморегуляции, а так называемыми “executive functions”, означающими в переводе функции и управленческие, и исполнительские (см. подробнее, [3]). Это противоречивое по смыслу толкование отражает неразрешимый до сих пор парадокс о свободе воли человека в выборе своего поведения или воспроизведения приобретенных в ходе жизненного опыта определенных правил и установок, преодоление которых требует отказа от прежних стереотипов или их частичного изменения. Этот новый вариант поведения может создаваться либо методом проб и ошибок, либо как результат озарения, но и в том, и в другом случае — вследствие изменений в системах организации тормозных и активационных функций мозга.

Управление изменением поведения (*executive functions*) представляет совокупность нисходящих (*top-down*) ментальных процессов, которые контролируют, регулируют и управляют разными компонентами поведения: планированием будущих действий, выбором решения в ситуации вероятностного исхода события или когнитивного диссонанса, переключением деятельности, в том числе при необходимости быстрой смены реакций [3, 89]. Функции тормозного контроля в этом управлении поведения включают самоконтроль, направленный на инициацию или подавление определенного типа деятельности; интерференционный контроль селективного внимания и воспроизведения информации; характеристики рабочей памяти и когнитивную гибкость [42, 98]. На основе этих ключевых функций управления мышлением и поведением выстраиваются функции более высокого порядка, такие как текущее или долгосрочное планирование решения проблем и формирование целей [90]. Тормозный контроль включает способность выделять и исправлять ошибки и следовать поставленным для себя целям, в том числе путем отказа от каких-то внутренних желаний или внешних соблазнов. Функции тормозного контроля оказываются полезными не только для выполнения того, что нужно в сложившихся обстоятельствах, но и в непредсказуемой или опасной ситуации или при планировании далекого будущего [42].

Известно, что тормозной контроль развивается в период 3–6 лет как результат формирования нейронных систем лобной коры [26, 58, 126]. Он отражает способность сосредоточивать и переключать внимание, игнорировать нерелевантную поставленную цели информацию; следовать инструкции и, отказываясь от признанного неверным в данной ситуации действия, или сдерживая импульсивные формы поведения, ожидать отсрочен-

ной награды. Соответственно, тормозный контроль как центральное звено системы исполнительного внимания отражает готовность к обучению, в том числе — школьному, и может предсказывать дальнейшую успешность в освоении чтения и математики [134].

Имеются доказательства специализации функций вендролатеральной части префронтальной коры и нижневисочной коры в организации тормозного контроля поведения [116]. Согласно заключению *M. Sakagami* с соавторами [116], принятие решения является результатом конкурирующих параллельно протекающих процессов, осуществляемых посредством дорзального и вентрального нейронных путей зрительной системы. Доминирование активности дорзального пути приводит к автоматической моторной реакции, а вентрального — к сознательному решению на основе анализа сенсорной информации и выбора соответствующего ответа при тормозном контроле поведения. Эти два нейронных пути могут быть относительно независимы в осуществлении решения или после обучения выполнять быструю трансформацию сенсорной информации в стереотипные команды двигательной реакции. В изменившейся ситуации приоритет приобретают процессы сознательного контроля решения с детальной обработкой информации в системе “вентральный зрительный пучок — нижневисочная кора — вендролатеральная префронтальная кора”.

На основе анализа данных о фракционной анизотропии белого вещества мозга показана связь возрастного развития когнитивного контроля и микроструктуры нервных волокон, обеспечивающих передачу информации между префронтальными областями коры и специализированными для выполнения двигательных или речевых операций корковых и подкорковых структур мозга [32, 93]. Так у детей 7–13 лет более быстрая реакция на стоп-сигнал сопровождалась более высокими показателями фракционной анизотропии во взаимодействии правой нижней лобной извилины и правой добавочной моторной коры, что, по мнению авторов, свидетельствует об ускорении нервной проводимости за счет лучше упакованных и хорошо миелинизированных нервных волокон [93]. Согласно результатам другого исследования, подростки 10–16 лет, успешнее выполнявшие задания с торможением или переключением реакции, характеризовались большей интеграцией микроструктуры белого вещества, связывающего сенсорные, моторные и префронтальные области коры [122].

Анализ индивидуальных особенностей тормозных функций у взрослых показал, что лучшим предиктором выполнения задания со стоп-сигналом является показатель радиальной диффузности волокон, связывающих *pars opercularis* и суб-

таламическое ядро; и в целом организацию торможения обеспечивают нервные пути между базальными ганглиями и медиальной фронтальной и вентролатеральной префронтальной областями коры [75].

Поведенческое торможение может быть результатом повышенной тревожности и возникающей вследствие этого застенчивости, поэтому возрастной период 3–5 лет является ключевым для формирования оптимального баланса эмоциональной реактивности и самоконтроля, закладывающего основу для дальнейшего развития социальной компетентности; тогда как нарушения в оценке соотношения угрозы и награды ведут к большей вероятности социальной изоляции или асоциального поведения в подростковом возрасте [55, 105]. Повышение эффективности процессов торможения в ходе имплицитного обучения и невербального кодирования поступающей в мозг информации и приобретения нового социального опыта сопровождается возрастное развитие и аффективного, и когнитивного компонентов “*Theory of Mind*” (*ToM*) [5, 9]. Согласно модели *ToM*, понимание поведения других людей, необходимое для социальной адаптации, развивается в первые годы жизни и включает те же функции, что необходимы для становления речи. Эти функции формируются на основе развития способностей к имитации (звуков, жестов, мимики) и “объединения” внимания (т.е. способности обращать внимание на один и тот же объект совместно с другим человеком, требуемой для символической репрезентации данного объекта), а также вследствие восприимчивости к эмоциям и намерениям других людей, на основе которых возможно планирование собственного поведения (см. подробнее [5]).

Когнитивный компонент *ToM* представлен функциями нейронных систем дорзальной медиальной префронтальной коры, передней сингулярной коры и стриатума, а аффективный компонент связан с активностью вентральных областей перечисленных структур мозга, а также орбитофронтальной коры и амигдалы [9].

Изучению соотношения тормозного контроля и развития вербальных способностей уделяется особое внимание, так как связь этих процессов отмечена и в раннем онтогенезе, и в школьном возрасте [36, 70]. При комплексном обследовании 4-х летних детей было показано, что физиологические характеристики (ЭЭГ и ЧСС), темперамент и развитие речи способны объяснить до 90% эффективности их рабочей памяти и тормозного контроля [135]. Учитывая рост в последнее время нарушений развития детей [1], в том числе проблем с освоением языковых функций у детей младшего возраста [80], глубокое понимание механизмов тормозного контроля необходимо для

разработки психолого-педагогической приемов коррекции или повышения эффективности обучения и воспитания младших школьников.

Известен ряд работ, выполненных для анализа возрастных особенностей в развитии тормозного контроля и возможностей его тренировки у детей 3–6 лет. При этом использовали стандартные тесты (*go/no-go*, *go/stop*, *flanker-task*, задачи Струпа и т.п.) (см. [3]), требующими для организации ответа разрешать конфликт информации на сенсорном и моторном уровнях. Обучение детей сопротивлению импульсивному принятию решения, игнорированию дистракторов, гибкости мышления или выполнению других заданий (40 вариантов согласно программе “*the Tools of the Mind curriculum*”) [42, 43], требующих тормозного контроля, свидетельствует об его успешности. Что касается долгосрочной устойчивости этого эффекта или переноса на другие когнитивные функции, то мнения исследователей различаются [87]. Однако сведения о положительном воздействии специально разработанных программ для развития саморегуляции поведения дошкольников и школьников, особенно для тех, кто имел проблемы с гиперактивностью, невниманием или усвоением речевых навыков [69, 94, 125, 139], указывает на перспективность дальнейших исследований этой проблемы и поиска причин расхождения полученных результатов. Перспективность тренинга когнитивных функций, в том числе рабочей памяти, математических способностей младших школьников, а также показателей невербального интеллекта, чтения и тормозного контроля [119], доказывает вызванное тренировкой повышение успеваемости, причем именно исполнительные функции опосредуют связь между успехами в математике в пять лет и затем через пять лет обучения в школе [113].

Еще одним предиктором академической успеваемости и успехов в математике и чтении в широком возрастном диапазоне от 4-х до 13-ти лет [136] является когнитивная гибкость — компонент исполнительного контроля, который также поддается целенаправленной тренировке [29].

Имеются данные о том, что разные формы тормозного контроля, относящиеся к вниманию (устойчивость к появлению дистракторов) и действию (подавление несоответствующего инструкции ответа), представлены одними и теми же нейронными структурами и объединяются в один фактор [56]. С другой стороны, существуют доказательства различных механизмов тормозного контроля и отставленного вознаграждения [42]. Если задание требует использовать один тип самоконтроля (например, не есть сладкое), а потом сразу же предлагается другой вид самоконтроля (“стоп-сигнал”), выполнение второй задачи ухудшается по сравнению с ситуацией, когда она выполнялась без

предварительной задачи с самоконтролем. По-видимому, само содержание экспериментальных заданий (тип стимулов или сложность задачи) определяет организацию исполнительных функций, которая в зависимости от индивидуальных особенностей развития мозга 3–6 летнего ребенка либо включает дифференцированный компонентом задания контроль тормозных и активационных процессов [57], либо представляет уникальный процесс [70, 133].

Качество тормозного контроля детей имеет прогностическую значимость в отношении их поведения в дальнейшем. В лонгитюдном исследовании 1000 детей, рожденных в одном и том же городе в один и тот же год, показано, что те, кто в возрасте от 3 до 11 лет имел лучшие показатели тормозного контроля (меньше реагировал на дистракторы, был более настойчивым и менее импульсивным) с большей вероятностью не покидали школу в подростковом возрасте, с меньшей вероятностью курили или употребляли наркотики [99]. Став взрослыми, они имели лучшее физическое и психическое здоровье (например, меньшую вероятность избыточного веса или высокого артериального давления, у них не было проблем зависимости), большую заработную плату и реже нарушали закон в 30 лет по сравнению с теми, у кого были ниже показатели тормозного контроля до 11 лет. Предполагается, что сформированность тормозного контроля в детстве предопределяет уровень интеллекта в будущем, социальный статус и качество семейной жизни. Столь значимая роль процессов саморегуляции в детском возрасте для развития адаптивных форм поведения и сохранения здоровья у подростков и взрослых [97] требует понимания закономерностей механизмов развития тормозного контроля в онтогенезе и соответствующих способов его целенаправленной коррекции.

Таким образом, к основным структурам управления изменением поведения следует отнести префронтальную кору, разные области которой включены в специализированный контроль интегративных процессов мышления и поведения; переднюю сингулярную кору, как часть лимбической системы эмоционального и мотивационного реагирования (отвечает за тормозный контроль нежелательных ответов); и орбитофронтальную кору, участвующую в оценке значимости стимула и в контроле импульсивного, агрессивного или антисоциального поведения [100, 109, 114, 131].

ЗНАЧЕНИЕ ТОРМОЗНОГО КОНТРОЛЯ ПРИ СТАРЕНИИ

Изучению организации тормозных функций уделяется большое внимание не только на ранних, но и на поздних этапах онтогенеза, так как снижение тормозного контроля при старении

рассматривается как основа возрастного ослабления эффективности разных когнитивных функций [37, 65]. Анализ результативности выполнения заданий, требующих селекции конгруэнтных и неконгруэнтных стимулов, показывает, что вне зависимости от типа задачи пожилые люди существенно хуже, чем молодые, игнорировали и зрительные, и слуховые дистракторы [138] и были более чувствительны к интерференции irrelevantной информации [78]. Известна, однако, и другая точка зрения: дефицит тормозного контроля в большей степени относится к механизмам спонтанного подавления irrelevantных сигналов, тогда как внимание к стимулам, которые определены инструкцией, может в пожилом возрасте даже улучшаться [59].

Что касается ухудшения способности игнорировать irrelevantную информацию у пожилых по сравнению с молодыми, то оно показано при тестировании негативного прайминга с использованием разных стимулов: букв, слов, картинок или геометрических фигур. Хотя в случае применения другой версии негативного прайминга, в которой требовалось определить расположение стимулов, а не их идентичность, возрастные различия в тормозном контроле не были обнаружены. Вследствие этого возникла гипотеза, что при старении нарушаются селективные функции тормозного контроля, в которых задействован ventral затылочно-височный путь обработки зрительной информации, а не dorsal затылочно-теменной [138].

Так как наряду с данными, свидетельствующими об ослаблении тормозного контроля при старении, имеются доказательства отсутствия возрастных различий с применением практически всех перечисленных выше методик, то для объяснения обнаруженных противоречий предлагается рассматривать разные варианты интеграции когнитивных ресурсов как результат дифференциации процессов торможения в системах организации восприятия, моторики и речи [60].

Возрастное снижение эффективности когнитивной деятельности представлено тремя основными взаимосвязанными процессами: ухудшением тормозного контроля, снижением рабочей памяти и скорости ментальных операций; однако единства во мнениях, какой из них является ведущим, пока не достигнуто [64, 115, 127]. Имеются доказательства, что возрастные изменения скорости обработки информации и процессов интерференции при тестировании вербальной памяти и понимания речи обусловлены снижением объема рабочей памяти. С другой стороны, негативная связь возраста и эффективности рабочей памяти объясняется влиянием скорости и в меньшей степени торможением (которое в свою очередь является тем механизмом, который обуслов-

ливают скорость). Наконец, третья точка зрения опирается на результаты структурного моделирования, согласно которым возраст независимо влияет и на скорость ментальных процессов, и на тормозной контроль, и на память.

Ведущая роль процессов торможения в изменениях других когнитивных функций определяется тем, что тормозной контроль ответственен за эффективность идентификации и селекции релевантной информации в рабочей памяти, переключение внимания или поддержание его фокуса при выполнении последовательности действий с игнорированием дистракторов и, наконец, выбор наиболее приемлемого решения [65]. Рассматривая отдельно функции торможения в рабочей памяти, выделяют контроль доступа информации, “стирание” иррелевантной и регуляцию времени удержания релевантной информации. Известный феномен “забывание, вызванное извлечением из памяти”, связывают с тормозными процессами, которые способствуют разрешению конкуренции информации при поиске той, которая необходима для реализации цели. Извлечение нужной информации из памяти приводит к забыванию другой, неактуальной в данный момент.

Таким образом, эффективный тормозной контроль позволяет сохранять в рабочей памяти поставленные цели и осуществлять доступ к той информации, которая необходима для решения актуальных проблем с удалением ненужной. Оба эти процесса нарушаются при старении [65], поэтому наиболее сложной для организации поведения пожилых людей является среда, насыщенная новой разнообразной информацией.

Особое внимание к изучению возрастных изменений тормозных процессов в механизмах рабочей памяти связано с тем, что она лежит в основе реализации многих когнитивных функций, включая речь, планирование деятельности и решение ежедневно возникающих проблем. Усиление проактивной интерференции рассматривается как механизм ослабления эпизодической памяти в старости [65]. Ухудшение процессов “стирания” иррелевантной информации из памяти показано на примере повышения проактивной интерференции у пожилых людей при тестировании запоминания списков слов из разных семантических категорий по сравнению с молодыми. Однако механизм этого эффекта остается не ясным, так как гипотеза о его связи с изменениями активационного уровня не соответствует результатам анализа индивидуальных особенностей циркадианного ритма [66].

Обнаруженные возрастные изменения в процессах запоминания и воспроизведения информации используются для компенсации дефицита памяти. Например, его можно снизить за счет анализа последовательности событий с удержа-

нием в памяти цели поведения и фиксации изменений промежуточных эпизодов, что противодействует интерференции [85]; или вследствие лучшего имплицитного запоминания разных перцептивных и концептуальных свойств информации, предъявленной в качестве дистракторов [27].

Еще одним компенсаторным процессом является характерное для пожилого возраста усиление мультисенсорной интеграции характеристик одновременно предъявленных стимулов разной модальности при ослаблении тормозного контроля [41]. Механизмы этого эффекта, однако, остаются не ясными, так как результаты серии выполненных экспериментов указывают на потенциально разные пути его развития: инверсию эффективности селекции сигналов на фоне ухудшения унимодальной сенсорной перцепции, увеличение периода интеграции характеристик стимулов при их обработке или повышение фоновой активности мозга, вследствие которого возникает парадоксальное соотношение в функциональной активации коры: обработка стимулов высокой интенсивности вызывает слабую активацию, а слабой интенсивности – наоборот, высокую [101].

Разнообразию полученных результатов можно связать не только с индивидуальными различиями в скорости старения и реорганизации когнитивных функций у пожилых людей [6, 7], но и с разными тормозными механизмами, ответственными за реализацию поведенческих реакций, в том числе при выполнении экспериментальных заданий [54, 86]. Способность подавлять свои импульсивные действия, формировать стоп-реакцию – это фундаментальный механизм когнитивного контроля, который представлен системой правая нижняя лобная кора, добавочная моторная кора и субталамическое ядро, структурные связи между которыми ослабляются при старении [14, 17, 35]. Однако принятие решения об осуществлении моторных реакций включает деятельность многих других систем мозга, участвующих в селекции разных характеристик поступающей информации и торможении признанных нерелевантными ее свойств. В этот процесс торможения включаются и скоростные характеристики передачи информации, индивидуальный мотивационный компонент поведения, т.е. структура знаний и морально-этических норм, в соответствии с которыми происходит принятие решения.

Тормозной контроль предлагается концептуально дифференцировать, выделяя “сдерживание действия” (или автоматическое ингибирование снизу вверх) и “аннулирование действия” (или контролируемое торможение сверху вниз), причем только на последний эффект торможения влияет предъявление негативных стимулов [86].

Исследование разных типов тренировки когнитивных функций: рабочей памяти или испол-

нительного контроля в группе 18–30 лет выявило больший эффект улучшения когнитивных функций для высокомотивированных лиц, а перенос эффекта улучшения на уровень IQ согласно тесту Равена был максимален для тренировки исполнительного внимания [94]. В другом исследовании, однако, достоверного эффекта переноса исполнительного контроля не было выявлено, хотя его улучшение по сравнению с контрольными показателями достигнуто и в молодом, и в пожилом возрасте [120]. Более поздние выводы этой же исследовательской группы свидетельствуют о долговременном эффекте тренировки и переносе результативности запоминания чисел и букв [121]. В свою очередь ряд работ показывает эффективность тренировки рабочей памяти с использованием как вербальных, так и образных стимулов и сохранение улучшения в течение длительного времени [6]. Однако эффект тренировки зависел не только от возраста, но и от базового состояния памяти, и от динамики ее изменения [6, 141].

Недавно выполненный мета-анализ литературных данных выявил улучшение когнитивных функций без существенных различий в разных типах тренировки с более выраженным эффектом в пожилом возрасте, чем в молодом, и переносом улучшения на интеллект, хотя этот эффект не распространялся на решение ежедневных проблем [74]. Результаты другого, более позднего мета-анализа тренировки рабочей памяти, свидетельствуют об устойчивом эффекте повышения показателей памяти вследствие практики, но по отношению к другим когнитивным функциям он был представлен в разной степени, отчего вновь возникают сомнения в практической ценности тренировки для решения ежедневных проблем [95].

Для объяснения ухудшения когнитивных функций и потери адаптационных резервов в старости предлагается несколько теорий [6, 12], в том числе “дефицита торможения” [65]. Однако ни эта теория, ни известные модели “лобного старения” [132] или нарушения координации функциональных нейронных систем [24, 84] не позволяют пока понять наблюдаемую вариативность в изменениях когнитивных функций у людей пожилого возраста.

Хотя установлено, что характеристики исполнительных функций являются лучшими предикторами качества жизни и вероятности развития старческой деменции [30], остается неясным, какой фактор является основным: общее снижение скорости ментальных процессов, которое рассматривается как основная причина ухудшения показателей разных когнитивных функций при старении [117], или нарушения в тормозном контроле релевантной и нерелевантной информации.

Томографические исследования с использованием анализа фракционной анизотропии выяви-

ли коррелирующие со снижением показателей когнитивной деятельности возрастные нарушения интеграции белого вещества мозга, наиболее выраженные в передней части мозга и в мозолистом теле [52, 88, 91]. Так как эти изменения можно рассматривать как подтверждение любой из упомянутых выше гипотез, необходимо дальнейшее выяснение приоритетов в последовательности нарушений взаимосвязанных когнитивных процессов в системах внимания и памяти. Решение этого вопроса имеет не только фундаментальное, но и практическое значение для разработки наиболее эффективных методов активизации компенсаторных резервов мозга, которые могут предотвратить или замедлить раннее наступление старческой деменции и повысить качество жизни пожилых людей [6, 104].

ЗНАЧЕНИЕ ТОРМОЗНОГО КОНТРОЛЯ В ЭФФЕКТИВНОСТИ ТВОРЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Исследование механизмов организации тормозных функций центральной нервной системы занимает важное место при комплексном изучении психологических и нейрофизиологических закономерностей реализации креативных способностей, развернувшееся в последние десятилетия [5, 8, 21, 23, 31, 34, 44, 49–51, 63, 106, 111, 130, 137].

Интенсивные исследования в этом направлении были инициированы гипотезой Мартиндейла о разных стадиях творческого процесса со сменой фокусированного и дефокусированного внимания и соответствующим усилением активации или торможения локальных или отдаленных участков коры головного мозга. Ожидаемый эффект ослабления активации согласно мощности альфа-ритма преимущественно в лобных областях коры был получен в исследованиях ЭЭГ коррелятов креативности в разных экспериментальных условиях [5, 7, 49, 51]. Учитывая функциональное значение синхронизации альфа осцилляций, обнаруженная деактивация может отражать интернальное внимание, направленное на поиск оригинальной идеи с торможением irrelevantной информации [22, 23].

Имеются, однако, исследования, которые показывают другие формы частотно-пространственной организации активности коры, сопровождающие высокие показатели вербальной или образной креативности, а также решения эвристической задачи: противоположные альфа-синхронизации эффекты активации коры, вызванные решением креативного задания, и разные топографические особенности ЭЭГ коррелятов креативности с доминированием левого/правого полушария или передних/задних отделов коры [5, 7, 44, 96].

Известно, что нейронные системы префронтальной коры выполняют функции инициации решения проблемы, выбора операторов и контроля их выполнения или дополнительного поиска других операторов, и именно они рассматриваются как основные в организации тормозного контроля. Креативное решение проблем включает способности формировать интуитивные ассоциации и тормозить стереотипные, ранее использованные и запомненные классические решения поставленных задач (придумать образ, найти ассоциацию, составить предложение или найти способ использования предмета и т.д.).

Дуальная теория принятия решения включает две системы: интуитивную и аналитическую (эвристическое решение возникает быстро и автоматически, а аналитическое требует большего времени вследствие размышления над каждым шагом) [46, 47]. Однако, неясно, как происходит переключение между функциями этих систем, которое часто встречается в творческой деятельности.

Исполнительная система и “система мозга по умолчанию” (*DMN*) представляют нейронные системы, выполняющие реципрокные функции: *DMN* активирована в ситуации отсутствия целенаправленного внешнего воздействия (т.е. состояние сходно с периодом инкубации как стадии креативного поиска идеи), а исполнительная — контролирует деятельность соответственно поставленным целям. “Блуждание мысли” (*mind wandering*) (*MW*) как функция *DMN* отражает отвлечение внимания от текущей задачи к собственным мыслям и при интернально сфокусированном интересе к решению проблемы, по-видимому, поддерживает потенциально продуктивный поиск оригинальной идеи с подключением на финальной стадии функций исполнительной системы мозга, необходимых для критической оценки и фиксации конечного решения. *MW* может быть адаптивным, так как способствует самоанализу, регулированию настроения и планированию позитивного будущего при отставленном вознаграждении (см. [25]).

Доказательства совместного включения исполнительной системы и *DMN* при создании оригинального художественного произведения получены с использованием фМРТ, причем более сильное взаимодействие структур этих систем было отмечено в деятельности профессиональных художников по сравнению с непрофессионалами [39].

Известны альтернативные точки зрения на взаимосвязь *MW*, рабочей памяти и исполнительной внимания, каждая из них опирается на соответствующие эмпирические доказательства: 1) *MW* требует ресурсов памяти и не может сохраняться, когда ресурсы потребляются задачей или

2) *MW* обходится без поддержки рабочей памяти, но уменьшается при выполнении сложной задачи, так как для ее успешного решения необходимо ограничение внимания, чтобы исключить мысли, не имеющие отношения к задаче. Специально выполненное исследование для разрешения этой дилеммы выявило значение контекста во взаимосвязи *MW* и ресурсов рабочей памяти: когда ограничение внимания к задаче не имеет приоритета, ресурсы памяти могут свободно поддерживать *MW*; если внимание уделяется задаче, тогда все ресурсы направлены на сохранение этой цели и блокируют *MW* [83]. Следовательно, двойственная роль ресурсов мозга, задействованных в решение проблемы или предоставленных *MW*, определяется как объективной сложностью поставленной проблемы, так и ее субъективной оценкой. Кроме того, согласно теории когнитивных ресурсов, негативная связь *MW* и эффективности выполнения задания усиливается не только с усложнением задания, но и с повышением его длительности [110].

Сходство характеристик *MW* и дефокусированного внимания вызвало серию исследований связи *MW* и креативности [16, 28, 108, 124]. Обнаружено, что облегчение выполнения креативного задания может быть достигнуто предьявлением простой задачи в инкубационный период, усиливающим *MW* [16]. Анализ ассоциации исполнительного контроля и креативности, выполненный посредством сопоставления емкости рабочей памяти, *MW* и результативности выполнения заданий разной сложности выявил весьма слабую связь между *MW* и пост-инкубационной эффективностью дивергентного мышления, а также сильную связь емкости рабочей памяти и аналитического мышления, что указывает на существование разных компонентов креативности [124]. Поддерживающее и фокусированное внимание необходимо для селекции релевантных решению задачи идей и торможения нерелевантной информации, тогда как дефокусированное и *MW* — для свободного доступа к релевантным, но удаленным по смыслу концепциям.

Взаимодействие процессов генерации креативных идей, исполнительного контроля, тормозных функций и рабочей памяти обнаружено при тренировке экспериментальной креативной деятельности с применением обратной связи и ослаблением эффекта фиксации решения задания [11, 48].

В специально организованном исследовании с анализом роли трех специфических компонентов исполнительной системы: обновления ресурсов информации, переключения и торможения, рассматривали их общие и дифференциальные отношения с флюидным интеллектом и способностями к дивергентному мышлению на основе струк-

турного подхода с латентными переменными. Оказалось, что предикторами креативности являются торможение и обновление рабочей памяти, причем последний компонент объяснял также вариативность *IQ* [23].

Учитывая две классические стадии креативного мышления, генерацию идей связывают с диффузным вниманием и нейронными процессами “снизу–вверх” (*bottom–up*), а их оценивание – с фокусированным вниманием и исполнительным контролем, т.е. процессами “сверху–вниз” (*top–down*) [72]. Эти процессы обеспечивает кооперация *DMN* и системы исполнительного контроля [18, 23, 45]. Известно, что активность *DMN* отражает разнообразные индивидуальные характеристики личности, в том числе – уровень интеллекта или открытость опыту – психометрические показатели, имеющие связь с креативностью [20, 40, 118]. Поэтому неудивительно, что уникальное взаимодействие указанных нейронных структур создает вариативные паттерны активации – торможения, лежащие в основе решения креативного задания.

При выяснении топографической специфики функциональной активности мозга, связанной с креативностью, актуально не только понимание роли правого и левого полушария, но и функций передних и задних отделов мозга. Согласно классической точке зрения, с тормозным контролем связывают функции нижней лобной извилины [14, 68], а взаимодействие лобных областей и височно-теменно-затылочной зоны обеспечивает поиск нестандартных идей и их оценивание [44]. Что касается поиска более точной региональной специфики нейронных систем, обеспечивающих разные составляющие креативности, то с развитием фМРТ число функционально значимых зон все более увеличивается, при этом высказывается мнение, что томографические методы могут быть наиболее полезны для изучения процессов торможения [40]. Однако на настоящий момент имеются противоречивые данные относительно роли, например, таких областей как языковая извилина (*lingual gyrus*) и клин (*cuneus*). Толщина коры в этих областях согласно данным одних авторов негативно коррелирует с оригинальностью дивергентного мышления [73], согласно другим – позитивно [50] и связана с беглостью идей [71]. Одни авторы выделяют левую часть языковой извилины как структуру, относящуюся к созданию образных представлений [140], другие – правую часть клина и предклинья [50]. Инсайтное решение проблемы сопровождается активацией в префронтальной коре [13] или правой передней верхней височной извилине и передней сингулярной коре [72, 77].

В отношении полушарной специфики креативности также остается ряд вопросов. Несмотря

на заключение о доминировании правого полушария [96], сделанного на основе мета-анализа представленных в литературе результатов исследований креативности, имеются данные о ключевой роли левого полушария в организации экспериментально организованной творческой деятельности [15], в том числе заключение об активации левой дорзолатеральной префронтальной коры в ситуации решения проблемы на основе инсайтной стратегии [107].

Таким образом, индивидуальная стратегия генерации креативной идеи может определяться соотношением принципиально разных когнитивных процессов: контролирующих функций внимания или дефокусированного внимания [21, 23], предпочтения локально организованной левополушарной селекции информации или глобальной правополушарной [111, 137, 142], использования ресурсов рабочей/эксплицитной/ имплицитной памяти [33, 38, 81].

Возрастная специфика тормозного контроля рассматривается как ключевой вопрос механизмов креативного мышления в связи с тем, что префронтальные области претерпевают наиболее выраженные изменения в онтогенезе [62], активируются при генерации креативных идей [21, 121] и вовлекаются в тормозной контроль [31].

Лобные доли начинают созревать в 7 лет, а “творить” дети начинают с момента рождения. Именно поэтому творчество взрослых и творчество дошкольников – принципиально разные явления. Для творчества взрослого нужно создание нового явления, ранее не представленного в культуре, творчество ребенка – это то, что он впервые создает сам, хотя бесконечная череда людей прошла уже эту стадию. Именно поэтому творчество ребенка – это переосмысление им услышанных от других сказок, рисование окружающих объектов, освоение речи и, наконец, созидание собственной личности [2].

Для определения креативных способностей детей школьного возраста уже возможно применение психометрического подхода. Показано, что у первоклассников креативность и интеллект не имеют достоверной связи, а уровень общего и невербального интеллекта определяется скоростными возможностями сенсомоторной интеграции (при низких показателях тормозного контроля). В 11–12 лет ситуация меняется: наряду с повышением тормозного контроля уровень общего интеллекта и креативность тесно коррелируют друг с другом и не зависят от скоростных процессов сенсомоторной интеграции [4].

Известно, что подростковый период (10–16 лет) характеризуется, с одной стороны, повышенной чувствительностью ко всему новому, а с другой, – развитием всех компонентов когнитивного контроля: координации поведения в соответствии с

намеченными целями, переключения задач и ресурсов рабочей памяти и тормозного контроля нежелательных реакций [89]. У подростков в сравнении с группой взрослых людей отмечена повышенная активация лобных отделов коры, ассоциированная с более высокой эффективностью решения креативных проблем [76]. Анализ вербальной и образной креативности в двух возрастных группах 15–17 и 25–30 лет не выявил значимых межгрупповых различий в показателях креативности, только для образной креативности обнаружена независимая от возраста положительная связь с толщиной коры в правой средней височной извилине и в ряде левополушарных областей, включая верхнюю лобную извилину [34]. Таким образом, вопрос о причинах вариативности в функциональных взаимоотношениях креативности и региональной активности мозга остается открытым.

Согласно теории типичного когнитивного развития, способность сопротивляться первой пришедшей на ум идее и переключаться на поиск другой стратегии является основой креативности в любом возрасте. Однако функциональная фиксация объекта, которая препятствует возможности его альтернативного использования, развивается уже у 6–7 летних детей (для 5-ти летних детей характерен иммунитет к функциональной фиксации) [61]. Механизм этого перехода: взаимодействия между накопленными знаниями, концептуальной структурой и представлением проблемы остается пока неясным. В целом, однако, отмечается повышение психометрических показателей креативности от детского к подростковому возрасту, хотя в разные периоды у подростков могут происходить падения эффективности выполнения заданий [79].

Акцент на механизмы извлечения информации, сохраняющиеся в памяти, и взаимодействие ее имплицитных и эксплицитных ресурсов – еще одно направление поиска закономерностей решения креативных проблем [67]. В этом случае аналогично вышеупомянутой дуальной теории на стадии постановки проблемы и ее верификации используется модуль преимущественно эксплицитно представленных знаний, а на стадии инкубации – имплицитно представленных. Взаимодействие между этими системами определяется порогом активации, который определяет уровень внутренней уверенности относительно принятия решения или продолжения поиска ответа. Так как объем не только рабочей памяти, но и приобретенных знаний существенно различается в детском и пожилом возрасте, то логично предположить и разные возрастные предпочтения в соотношении имплицитно или эксплицитно ориентированного поиска решения креативного задания.

Большинство исследований креативности выполнено с привлечением к экспериментам детей или молодых людей – студентов, что неудивительно, так как понимание факторов, регулирующих реализацию творческих способностей, может повлиять на эффективность обучения и последующей деятельности в разных профессиональных сферах. Психометрическим исследованиям креативности пожилых людей уделяется гораздо меньше внимания, большая часть таких работ – это анализ личностных особенностей выдающихся людей в сфере науки или искусства. Автор обзора опубликованных за период 1980–2012 г.г. научных статей по этой теме делает оптимистическое заключение, что креативность сопровождает “успешное” старение [128]. Фактами для такого вывода послужили данные, что исследованиям креативности пожилых людей в 80-е годы было посвящено только 9%, а в 2000-х уже 57%. Вместе с этим отмечен недостаток эмпирических работ (только 23%), преимущественно представленные описания поведения людей из сферы искусства или роли активного стиля жизни в сохранении психического здоровья и творческого долголетия.

Усиление интереса к изучению механизмов изменения когнитивных функций при старении обусловлено широкой вариативностью степени этих изменений, а также все более возрастающим числом пожилых людей в разных странах. Успешная адаптация к быстро изменяющейся информационной и социальной среде требует от пожилого человека не только сохранения памяти и интеллекта, но и гибкости мышления.

Эффект возраста на показатели дивергентного мышления был проанализирован совместно с другими когнитивными характеристиками: индуктивным мышлением, словарным запасом, скоростью мышления и объемом памяти. Беглость формирования ассоциаций не различалась в зависимости от возраста (в диапазоне 17–75 лет), но группа 40–50 лет была лучшей по показателям вербальной гибкости и оригинальности [112].

В отличие от этого сравнение четырех возрастных групп показало пик всех компонентов вербального и образного дивергентного мышления в 20–35 лет, их стабилизацию в группе 36–55 лет и снижение в 56–75 лет [102, 103]. Динамика изменений отличалась только для показателя образной беглости, который был выше, чем вербальная беглость для всех трех групп: 56–74, 75–85 и 86–98 лет. Авторы работы делают заключение, что, несмотря на устойчивое снижение показателей креативности в пожилом возрасте, дивергентное мышление может быть ресурсом предотвращения когнитивных дисфункций при старении.

Имеются данные об отсутствии достоверного снижения дивергентного мышления при старении, хотя для этого необходимо было снять огра-

ничения во времени [53] и учесть эффект возрастных изменений памяти [10, 92].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, для понимания разнообразных функций тормозного контроля необходимо сопоставление уровня фокусированного/дефокусированного внимания, интернального/экстернального контроля решения проблемы, вербальной/образной природы с использованием имплицитной/эксплицитной памяти и дивергентного/конвергентного мышления. Так как каждая из перечисленных составляющих когнитивной деятельности, согласно приведенным данным, имеет свои специфические особенности в детском и пожилом возрасте, выделение ключевых моментов изменения тормозного контроля в онтогенезе с учетом этих особенностей позволит понять механизмы организации успешного или дезадаптивного поведения.

Статья подготовлена в рамках работы по гранту РФФИ № 17-06-00166 “Организация тормозного контроля в онтогенезе: значение для обучения и адаптации”, часть ее содержания ранее опубликована в материалах Всероссийской конференции по когнитивной науке КИСЭ-2017.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безруких М.М., Логинова Е.С., Парцалис Е.М. Комплексная диагностика индивидуальных нарушений когнитивных функций и их коррекция // Физиология человека. 2015. Т. 41. С. 1–18.
2. Николаева Е.И. Психология детского творчества. СПб: Питер, 2017.
3. Николаева Е.И., Вергунов Е.Г. Что такое “Executive functions” и их развитие в онтогенезе // Теоретическая и экспериментальная психология. 2017. Т. 10. № 2. С. 62–81.
4. Николаева Е.И., Новикова А.В. Сравнительный анализ интеллекта и креативности с параметрами простой и сложной сенсомоторных реакций у младших подростков // Актуальные проблемы психологического знания. 2014. Т. 32. С. 47–52.
5. Разумникова О.М. Дифференциальная психофизиология. Новосибирск, Изд-во НГТУ. 2014. 164 с.
6. Разумникова О.М. Закономерности старения мозга и способы активации его компенсаторных ресурсов // Успехи физиол. наук. 2015. Т. 46. С. 3–16.
7. Разумникова О.М., Вольф Н.В. Реорганизация связи интеллекта с характеристиками внимания и памяти при старении // Журн. высш. нервн. деят. 2017. Т. 67. № 1. С. 55–67.
8. Разумникова О.М., Тарасова И.В., Вольф Н.В. Особенности активации коры у лиц с высокой и низкой вербальной креативностью: анализ альфа1,2 ритмов // Журн. высш. нервн. деят. 2009. Т. 59. С. 242–251.
9. Abu-Akel A., Shamay-Tsoory S. Neuroanatomical and neurochemical bases of theory of mind // Neuropsychologia. 2011. V. 49. № 11. P. 2971–2984.
10. Addis D.R., Pan L., Musicaro R., Schacter D.L. Divergent thinking and constructing episodic simulations // Memory. 2016. V. 24. P. 89–97.
11. Agogure M., Poirel N., Pineau A., Houdre O., Cassotti M. The impact of age and training on creativity: A design-theory approach to study fixation effects // Thinking Skills and Creativity. 2014. V. 11. P. 33–41.
12. Anderson N.D., Craik F.I.M. 50 years of cognitive aging theory // J. Gerontol. B. Psychol. Sci. Soc. Sci. 2017. V. 72. № 1. P. 1–6.
13. Antonietti A., Balconi M. Analogical reasoning: An incremental or insightful process? What cognitive and cortical evidence suggests // Cognitive Neurosci. 2010. V. 1. P. 137–138.
14. Aron A.R., Robbins T.W., Poldrack R.A. Inhibition and the right inferior frontal cortex: one decade on // Trends Cogn Sci. 2014. V. 18. № 4. P. 170–177.
15. Aziz-Zadeh L., Liew S.-L., Dandekar F. Exploring the neural correlates of visual creativity // Social. Cognitive and Affective Neuroscience. 2013. V. 8. P. 475–480.
16. Baird B., Smallwood J., Mrazek M.D., Kam J.W., Franklin M.S., Schooler J.W. Inspired by distraction: Mind wandering facilitates creative incubation // Psychol. Sci. 2012. V. 23. P. 1117–1122.
17. Bartoli E., Aron A.R., Tandon N. Topography and timing of activity in right inferior frontal cortex and anterior insula for stopping movement // Hum. Brain Mapp. 2018. V. 39. № 1. P. 189–203.
18. Beaty R.E., Benedek M., Kaufman S.B., Silvia P.J. Default and executive network coupling supports creative idea production // Scientific Reports. 2015. V. 5. № 10964. doi 10.1038/srep10964
19. Beaty R.E., Benedek M., Wilkins R.W., Jauk E. et al. Creativity and the default network: A functional connectivity analysis of the creative brain at rest // Neuropsychologia. 2014. V. 64. P. 92–98.
20. Beaty R.E., Kaufman S.B., Benedek M., Jung R.E. et al. Personality and complex brain networks: The role of openness to experience in default network efficiency // Hum. Brain Mapp. 2016. V. 37. P. 773–779.
21. Beaty R.E., Silvia P.J., Nusbaum E.C., Jauk E., Benedek M. The role of associative and executive processes in creative cognition // Memory and Cognition. 2014. V. 42. № 7. P. 1186–1197.
22. Benedek M., Franz F., Heene M., Neubauer A.C. Differential effects of cognitive inhibition and intelligence on creativity // Pers. Individ. Differ. 2012. V. 53. № 4. P. 480–485.
23. Benedek M., Jauk E., Sommer M., Arendasy M., Neubauer A.C. Intelligence, creativity, and cognitive control: The common and differential involvement of executive functions in intelligence and creativity // Intelligence. 2014. V. 46. P. 73–83.
24. Bennett I.J., Madden D.J. Disconnected aging: Cerebral white matter integrity and age-related differences in cognition // Neuroscience. 2014. V. 276. P. 187–205.
25. Bertossi E., Ciaramelli E. Ventromedial prefrontal damage reduces mind-wandering and biases its tem-

- poral focus // *Soc. Cogn. Affect. Neurosci.* 2016. V. 11. P. 1783–1791.
26. *Best J.R., Miller P.H.* A developmental perspective on executive function // *Child Dev.* 2010. V. 81. P. 1641–1660.
 27. *Biss R.K., Campbell K.L., Hasher L.* Interference from previous distraction disrupts older adult's memory // *J. Gerontology Series B: Psychol. Sci. Soc. Sci.* 2013. V. 68. P. 558–561.
 28. *Borst G.A., Houde O.* Inhibition of misleading heuristics as a core mechanism for typical cognitive development: evidence from behavioural and brain-imaging studies // *Develop. Medicine & Child Neurology.* 2015. V. 57 (Suppl. 2) P. 21–25.
 29. *Buttelmann F., Karbach J.* Development and plasticity of cognitive flexibility in early and middle childhood // *Front. Psychol.* 2017. V. 20 (8). 1040.
 30. *Cahn-Weiner D.A., Farias S.T., Julian L. et al.* Cognitive and neuroimaging predictors of instrumental activities of daily living // *J. Int. Neuropsychol. Soc.* 2007. V. 13. P. 747–757.
 31. *Cassotti M., Agogue M., Camarda A., Houdé O., Borst G.* Inhibitory control as a core process of creative problem solving and idea generation from childhood to adulthood // *New Dir. Child. Adolesc. Dev.* 2016. V. 151. P. 61–72.
 32. *Chaddock-Heyman L., Erickson K.I., Voss M.W. et al.* White matter microstructure is associated with cognitive control in children // *Biological Psychology.* 2013. V. 94. P. 109–115.
 33. *Chein J.M., Weisberg R.W.* Working memory and insight in verbal problems: analysis of compound remote associates // *Mem. Cogn.* 2014. V. 42. P. 67–83.
 34. *Cousijn J.P., Koolschijn C.M.P., Zanolie K., Kleibeuker S.W., Crone E.A.* The relation between gray matter morphology and divergent thinking in adolescents and young adults // *PLoS One.* 2014. V. 9(12). e114619.
 35. *Coxon J.P., van Impe A., Wenderoth N., Swinnen S.P.* Aging and inhibitory control of action: Cortico-subthalamic connection strength predicts stopping performance // *J. Neurosci.* 2012. V. 32. № 24. P. 8401–8412.
 36. *Cuevas K., Bell M.A.* Infant attention and early childhood executive function // *Child Dev.* 2014. V. 85. P. 397–404.
 37. *Darowski E.S., Helder E., Zacks R.T., Hasher L., Hambrick D.Z.* Age-related differences in cognition: the role of distraction control // *Neuropsychology.* 2008. V. 22. P. 638–644.
 38. *De Dreu C.K.W., Nijstad B.A., Baas M., Wolsink I., Roskes M.* Working memory benefits creative insight, musical improvisation and original ideation through maintained task-focused attention // *Pers. Soc. Psychol. Bull.* 2012. V. 38. P. 656–669.
 39. *De Pisapia N., Bacci F., Parrott D., Melcher D.* Brain networks for visual creativity: a functional connectivity study of planning a visual artwork // *Scientific Reports.* 2016. V. 6. № 39185.
 40. *DeYoung C.G., Hirsh J.B., Shane M.S. et al.* Testing predictions from personality neuroscience: Brain structure and the Big Five // *Psychol. Sci.* 2010. V. 21. P. 820–828.
 41. *Diaconescu A.O., Hasher L., McIntosh A.R.* Visual dominance and multisensory integration changes with age // *Neuroimage.* 2013. V. 65. P. 152–166.
 42. *Diamond A.* Executive functions // *Annu. Rev. Psychol.* 2013. V. 64. P. 35–68.
 43. *Diamond A., Barnett T.J., Munro W.S.* Tools of the mind preschool program improves cognitive control // *Science.* 2007. № 318. P. 1387–1388
 44. *Dietrich A., Kanso R.* A review of EEG, ERP, and neuroimaging studies of creativity and insight // *Psychol. Bull.* 2010. V. 136. P. 822–848.
 45. *Ellamil M., Dobson C., Beeman M., Christoff K.* Evaluative and generative modes of thought during the creative process // *NeuroImage.* 2012. V. 59. P. 1783–1794.
 46. *Evans J.B.T.* “The heuristic-analytic theory of reasoning: Extension and evaluation” // *Psychonomic Bull. Rev.* 2006. V. 13. P. 378–395.
 47. *Evans J.* Dual-processing accounts of reasoning, judgment, and social cognition // *Ann. Rev. Psychol.* 2008. V. 59. P. 255–278.
 48. *Ezzat H., Camarda A., Cassotti M. et al.* How minimal executive feedback influences creative idea generation // *PLoS One.* 2017. V. 29. № 12(6). e0180458.
 49. *Fink A., Benedek M.* EEG alpha power and creative ideation // *Neuroscience and Biobehavioral Reviews.* 2014. V. 44. № 100. P. 111–123.
 50. *Fink A., Koschutnig K., Hutterer L. et al.* Gray matter density in relation to different facets of verbal creativity // *Brain Struct. Funct.* 2014. V. 219. P. 1263–1269.
 51. *Fink A., Grabner R.H., Benedek M., Reishofer G. et al.* The creative brain: investigation of brain activity during creative problem solving by means of EEG and fMRI // *Hum Brain Mapp.* 2009. V. 30. P. 734–748.
 52. *Fling B.W., Peltier S.J., Bo J. et al.* Age differences in interhemispheric interactions: callosal structure, physiological function, and behavior // *Frontiers in Neurosci.* 2011. V. 5. № 38.
 53. *Foos P.W., Boone D.* Adult age differences in divergent thinking: it's just a matter of time // *Educ. Gerontol.* 2008. V. 34. P. 587–594.
 54. *Forstmann B.U., Jahfari S., Scholte H.S. et al.* Function and structure of the right inferior frontal cortex predict individual differences in response inhibition: A Model-based approach // *J. Neurosci.* 2008. V. 28. № 39. P. 9790–9796.
 55. *Fox N.A., Henderson H.A., Rubin K.H., Calkins S.D., Schmidt L.A.* Continuity and discontinuity of behavioral inhibition and exuberance: Psychophysiological and behavioral influences across the first four years of life // *Child Development.* 2001. V. 72. P. 1–21.
 56. *Friedman N.P., Miyake A.* The relations among inhibition and interference control functions: a latent-variable analysis // *J. Exp. Psychol. Gen.* 2004. V. 133. P. 101–135.
 57. *Friedman N.P., Miyake A.* Unity and diversity of executive functions: Individual differences as a window on cognitive structure // *Cortex.* 2017. V. 86. P. 186–204.
 58. *Garon N., Bryson S.E., Smith I.M.* Executive function in preschoolers: A review using an integrative framework // *Psychol. Bull.* 2008. V. 134. P. 31–60.

59. *Gazzaley A., Nobre A.C.* Top-down modulation: bridging selective attention and working memory // *Trends Cogn. Sci.* 2012. V. 16. № 2. P. 129–135.
60. *Germain S., Collette F.* Dissociation of perceptual and motor inhibitory processes in young and elderly participants using the Simon task // *J. Int. Neuropsychol. Soc.* 2008. V. 14. P. 1014–1021.
61. *German T.P., Defeyter M.A.* Immunity to functional fixedness in young children // *Psychon. Bull. Rev.* 2000. V. 7. P. 707–712.
62. *Giedd J.N., Lalonde F.M., Celano M.J. et al.* Anatomical brain magnetic resonance imaging of typically developing children and adolescents // *J. American Acad. Child and Adolescent Psychiatry.* 2009. V. 48. P. 465–470.
63. *Gómez-Ariza C.J., Del Prete F., Prieto del Val L., Valle T., Bajo M.T.* Memory inhibition as a critical factor preventing creative problem solving // *J. Exp. Psychol. Learn. Mem. Cogn.* 2017. V. 43. № 6. P. 986–996.
64. *Grégoire S., Rivalan M., Le Moine C., Dellu-Hagedorn F.* The synergy of working memory and inhibitory control: Behavioral, pharmacological and neural functional evidences // *Neurobiology of Learning and Memory.* 2012. V. 97. P. 202–212.
65. *Hasher L., Zacks R.T.* Working memory, comprehension, and aging: A review and a new view. In: *Bower G.H.* (Ed.) *The psychology of learning and motivation.* San Diego, CA: Academic Press. 1988. V. 22. P. 193–225.
66. *Hasher L., Zacks R.T., May C.P.* Inhibitory control, circadian arousal, and age. In: *D. Gopher, A. Koriat* (Eds.), *Attention & Performance, Cognitive Regulation of Performance: Interaction of Theory and Application* Cambridge, MA: MIT Press. 1999. V. 17. P. 653–675.
67. *Hélie S., Sun R.* Incubation, insight, and creative problem solving: a unified theory and a connectionist model // *Psychol. Rev.* 2010. V. 117. P. 994–1024.
68. *Houde O., Borst G.* Evidence for an inhibitory-control theory of the reasoning brain // *Frontiers in Human Neuroscience.* 2015. V. 9. № 148.
69. *Howard S.J., Vasseleu E., Neilsen-Hewett C., Cliff K.* Evaluation of the preschool situational self-regulation toolkit (PRISIST) program for supporting children's early self-regulation development: study protocol for a cluster randomized controlled trial // *Trials.* 2018. V. 19. № 64.
70. *Hughes C., Ensor R., Wilson A., Graham A.* Tracking executive function across the transition to school: a latent variable approach // *Dev Neuropsychol.* 2010. V. 35. № 1. P. 20–36.
71. *Jauk E., Neubauer A.C., Dunst B., Fink A., Benedek M.* Gray matter correlates of creative potential: a latent variable voxel-based morphometry study // *Neuroimage.* 2015. V. 111. P. 312–320.
72. *Jung R.E., Segall J.M., Jeremy Bockholt H., Flores R.A. et al.* Neuroanatomy of creativity // *Hum. Brain Mapp.* 2010. V. 31. P. 398–409.
73. *Jung R.E., Mead B.S., Carrasco J., Flores R.A.* The structure of creative cognition in the human brain // *Front. Hum. Neurosci.* 2013. V. 7. № 330.
74. *Karbach J., Verhaeghen P.* Making working memory work: a meta analysis of executive-control and working memory training in older adults // *Psychol. Sci.* 2014. V. 25. P. 2027–2037.
75. *King A.V., Linke J., Gass A. et al.* Microstructure of a three-way anatomical network predicts individual differences in response inhibition: A tractography study // *NeuroImage.* 2012. V. 59. P. 1949–1959.
76. *Kleibeuker S.W., De Dreu C.K.W., Crone E.A.* Creativity development in adolescence: Insight from behavior, brain, and training studies. In *Barbot B.* (Ed.), *Perspectives on creativity development. New Directions for Child and Adolescent Development.* 2016. V. 151. P. 73–84.
77. *Kounios J., Beeman M.* The cognitive neuroscience of insight // *Annu. Rev. Psychol.* 2014. V. 65. P. 71–93.
78. *Kramer D.G., Larish H.J.E., Logan G.D., Strayer D.L.* Aging and inhibition: Beyond a unitary view of inhibitory processing in attention // *Psychology and Aging.* 1994. V. 9. P. 491–512.
79. *Lau S., Cheung P.C.* Developmental trends of creativity: What twists of turn do boys and girls take at different grades? // *Creativity Research J.* 2010. V. 22. P. 329–336.
80. *Law J., Rush R., Schoon I., Parsons S.* Modelling developmental language difficulties from school entry into adulthood: Literacy, mental health and employment outcomes // *J. Speech, Language and Hearing Research.* 2009. V. 52. P. 1401–1416.
81. *Lee C.S., Theriault D.J.* The cognitive underpinnings of creative thought: A latent variable analysis exploring the roles of intelligence and working memory in associative, divergent, and convergent thinking processes // *Intelligence.* 2013. V. 41. P. 306–320.
82. *Legon W., Punzell S., Dowlati E., Adams S.E., Stiles A.B., Moran R.J.* Altered prefrontal excitation/inhibition balance and prefrontal output: Markers of aging in human memory networks // *Cereb. Cortex.* 2016. V. 26. P. 4315–4326.
83. *Levinson D.B., Smallwood J., Davidson R.J.* The persistence of thought: Evidence for a role of working memory in the maintenance of task-unrelated thinking // *Psychol. Sci.* 2012. V. 23. P. 375–380.
84. *Li P., Tsapanou A., Razlighi Q.R., Gazes Y.* White matter integrity mediates decline in age-related inhibitory control // *Behav. Brain Res.* 2018. V. 339. № 26. P. 249–254.
85. *Lindenberger U., Ghisletta P.* Cognitive and sensory declines in old age: Gauging the evidence for a common cause // *Psychology and Aging.* 2009. V. 24. P. 1–16.
86. *Littman R., Takacs A.* Do all inhibitions act alike? A study of go/no-go and stop-signal paradigms // *PLoS ONE.* 2017. V. 12. № 10. e0186774.
87. *Liu Q., Zhu X., Ziegler A., Shi J.* The effects of inhibitory control training for preschoolers on reasoning ability and neural activity // *Sci. Reports.* 2015. № 14200.
88. *Lovden M., Laukka E.J., Rieckmann A. et al.* The dimensionality of between-person differences in white

- matter microstructure in old age // *Hum. Brain Mapp.* 2013. V. 34. P. 1386–1398.
89. Luna B., Marek S., Larsen B., Tervo-Clemmens B., Chahal R. An integrative model of the maturation of cognitive control // *Annu. Rev. Neurosci.* 2015. V. 38. P. 151–170.
 90. Lunt L., Bramham J., Morris R.G., Bullock P.R., Selway R.P. et al. Prefrontal cortex dysfunction and “jumping to conclusions”: bias or deficit? // *J. Neuropsychol.* 2012. V. 6. P. 65–78.
 91. Madden D.J., Bennett I.J., Burzynska A. et al. Diffusion tensor imaging of cerebral white matter integrity in cognitive aging // *Biochim. Biophys. Acta.* 2012. V. 1822. P. 386–400.
 92. Madore K.P., Jing H.G., Schacter D.L. Divergent creative thinking in young and older adults: extending the effects of an episodic memory // *Mem. Cognit.* 2016. V. 44. P. 974–988.
 93. Madsen K.S., Baaré W.F.C., Vestergaard, M. et al. Response inhibition is associated with white matter microstructure in children // *Neuropsychologia.* 2010. V. 48. № 4. P. 854–862.
 94. Maraver M.J., Bajo I M. T., Gomez-Ariza C.J. Training on working memory and inhibitory control in young adults // *Frontiers in Human Neuroscience.* 2016. V. 10. № 588.
 95. Melby-Lervåg M., Redick T.S., Hulme C. Working memory training does not improve performance on measures of intelligence or other measures of “Far Transfer”: Evidence from a Meta-Analytic Review // *Perspect Psychol. Sci.* 2016. V. 11. P. 512–534.
 96. Mihov K.M., Denzler M., Förster J. Hemispheric specialization and creative thinking: A meta-analytic review of lateralization of creativity // *Brain and Cognition.* 2010. V. 72. P. 442–448.
 97. Miller A.L., Gearhardt A.N., Fredericks E.M. et al. Targeting self-regulation to promote health behaviors in children // *Behavior Research and Therapy.* 2017. doi 10.1016/j.brat.2017.09.008
 98. Miyake A., Friedman N. The nature and organization of individual differences in executive functions: four general conclusions // *Curr. Dir. Psychol. Sci.* 2012. V. 21. P. 8–14.
 99. Moffitt T.E., Arseneault L., Belsky D., Dickson N., Hancox R.J. et al. A gradient of childhood self-control predicts health, wealth, and public safety // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 2011. V. 108. P. 2693–2698.
 100. Moriguchi Y., Hiraki K. Prefrontal cortex and executive function in young children: a review of NIRS studies // *Frontiers in Human Neuroscience.* 2013. V. 7. Article 867.
 101. Mozolic J.L., Hugenschmidt C.E., Peiffer A.M., Laurienti P.J. Multisensory integration and aging. In: M.M. Murray, M.T. Wallace (Eds.) *The Neural Bases of Multisensory Processes* Boca Raton (FL): CRC Press/Taylor & Francis. 2012. Ch. 20.
 102. Palmiero M., Di Giacomo D., Passafiume D. Divergent thinking and age-related changes // *Creativity Res. J.* 2014. V. 26. № 4. P. 456–460.
 103. Palmiero M., Nori R., Piccard L. Verbal and visual divergent thinking in aging // *Exp. Brain Res.* 2016. V. 235. P. 1021–1029.
 104. Park D.C., Reuter-Lorenz P. The adaptive brain: Aging and neurocognitive scaffolding // *Ann. Rev. Psychol.* 2009. V. 60. P. 173–196.
 105. Pérez-Edgar K., Bar-Haim Y., McDermott J.M. et al. Attention biases to threat and behavioral inhibition in early childhood shape adolescent social withdrawal // *Emotion.* 2010. V. 10. № 3. P. 349–357.
 106. Pidgeon L.M., Grealy M., Duffy A.N. et al. Functional neuroimaging of visual creativity: a systematic review and meta-analysis // *Brain and Behavior.* 2016. № 6. e00540.
 107. Qiu J., Li H., Jou J., Liu J., Luo Y, Feng T, Wu Z, Zhang Q. Neural correlates of the “Aha” experiences: evidence from an fMRI study of insight problem solving // *Cortex.* 2010. V. 46. P. 397–403.
 108. Radel R., Davranche K., Fournier M., Dietrich A. The role of (dis)inhibition in creativity: decreased inhibition improves idea generation // *Cognition.* 2015. V. 134. P. 110–120.
 109. Rae C.L., Hughes L.E., Anderson M.C., Rowe J.B. The prefrontal cortex achieves inhibitory control by facilitating subcortical motor pathway connectivity // *J. Neurosci.* 2015. V. 35. № 2. P. 786–794.
 110. Randall J.G., Oswald F.L., Beier M.E. Mind-wandering, cognition, and performance: a theory-driven meta-analysis of attention regulation // *Psychol. Bull.* 2014. V. 140. P. 1411–1431.
 111. Razumnikova O.M., Volf N.V. Creativity-related hemispheric selective processing: correlations on global and local levels of attentional set // *Creativity Res. J.* 2015. V. 27. P. 394–399.
 112. Reese H.W., Lee L.-J., Cohen S.H., Puckett J.M.-Jr. Effects of intellectual variables, age, and gender on divergent thinking in adulthood // *Intern. J. Behav. Develop.* 2001. V. 25. P. 491–500.
 113. Ribner A.D., Willoughby M.T., Blair C.B. Executive function buffers the association between early math and later academic skills // *Front. Psychol.* 2017. V. 8. № 869.
 114. Rolls E.T., Grabenhorst F., Edmund T. The orbitofrontal cortex and beyond: From affect to decision-making // *Progress in Neurobiology.* 2008. V. 86. P. 216–244.
 115. Rozas A.X., Juncos-Rabadán O., González M.S. Processing speed, inhibitory control, and working memory: three important factors to account for age-related cognitive decline // *Int. J. Aging Hum. Dev.* 2008. V. 66. P. 115–130.
 116. Sakagami M., Pan X., Uttl B. Behavioral inhibition and prefrontal cortex in decision-making // *Neural Networks.* 2006. V. 19. P. 1255–1265.
 117. Salthouse T.A., Soubelot A. Heterogeneous ability profiles may be a unique indicator of impending cognitive decline // *Neuropsychology.* 2014. V. 28. № 5. P. 812–818.
 118. Sampaio A., Soares J.M., Coutinho J., Sousa N., Gonçalves Ó.F. The Big Five default brain: functional evidence // *Brain Struct. Funct.* 2014. V. 219. P. 1913–1922.
 119. Sánchez-Pérez N., Castillo A., López-López J.A. et al. Computer-based training in math and working memory improves cognitive skills and academic achieve-

- ment in primary school children: Behavioral results // *Frontiers in Psychology*. 2017. V. 8. № 2327.
120. Sandberg P., Rönnlund M., Nyberg L., Stigsdotter N.A. Executive process training in young and old adults // *Neuropsychol. Dev. Cogn. B Aging Neuropsychol. Cogn.* 2014. V. 21. P. 577–605.
 121. Sandberg P., Stigsdotter N.A. Long-term effects of executive process training in young and old adults // *Neuropsychol. Rehabil.* 2016. V. 26. P. 761–782.
 122. Seghete K.L.M., Herting M.M., Nagel B.J. White matter microstructure correlates of inhibition and task-switching in adolescents // *Brain Res.* 2013. V. 1527. P. 15–28.
 123. Sietske W., Kleibeuker P., Cedric M.P. et al. Prefrontal cortex involvement in creative problem solving in middle adolescence and adulthood // *Developmental Cognitive Neuroscience*. 2013. V. 5. P. 197–206.
 124. Smeekens B.A., Kane M.J. Working memory capacity, mind wandering, and creative cognition: An individual-differences investigation into the benefits of controlled versus spontaneous thought // *Psychol. Aesthet. Creat. Arts*. 2016. V. 10. P. 389–415.
 125. Solomon T., Plamondon A., O'Hara A. et al. A cluster randomized-controlled trial of the impact of the tools of the mind curriculum on self-regulation in canadian preschoolers // *Front. Psychol.* 2018. V. 17. № 8. 2366.
 126. Swingler M.M., Willoughby M.T., Calkins S.D. EEG power and coherence during preschooler's performance of an executive function battery // *Dev. Psychobiol.* 2011. V. 53. P. 771–784.
 127. Sylvain-Roy S., Lungu O., Belleville S. Normal aging of the attentional control functions that underlie working memory // *J. Gerontol. B Psychol. Sci. Soc. Sci.* 2015. V. 70. P. 698–708.
 128. Tiego J., Testa R., Bellgrove M.A., Pantelis C., Whittle S. A hierarchical model of inhibitory control // *Front. Psycho.* 2018. V. 9. | Article 1339
 129. Tsai K.C. A review of the inquiry of creativity in older adults in journals // *British J. Education*. 2013. V. 1. P. 20–28.
 130. Vartanian O. Variable attention facilitates creative problem solving // *Psychology of Aesthetics, Creativity, and the Arts*. 2009. V. 3. P. 57–59.
 131. Volman I., Roelofs K., Koch S., Verhagen L., Toni I. Anterior prefrontal cortex inhibition impairs control over social emotional actions // *Current Biology*. 2011. V. 21. P. 1766–1770.
 132. West R.L. An application of prefrontal cortex function theory to cognitive aging // *Psychol. Bulletin*. 1996. V. 120. P. 272–292.
 133. Wiebe S.A., Sheffield T., Nelson J.M., Clark C.A., Chevalier N., Espy K.A. The structure of executive function in 3-year-olds // *J. Exp. Child Psychol.* 2011. V. 108. № 3. P. 436–452.
 134. Willoughby M.T., Kupersmidt J.B. Voegler-Lee M.E. Is preschool executive function causally related to academic achievement? // *Child Neuropsychol.* 2012. V. 18. P. 79–91.
 135. Wolfe C.D., Bell M.A. Working memory and inhibitory control in early childhood: Contributions from physiology, temperament, and language // *Dev. Psychobiol.* 2004. V. 44. № 1. P. 68–83.
 136. Yenziad N., Malda M., Mesman J., van Ijzendoorn M.H., Pieper S. Shifting ability predicts math and reading performance in children: a meta-analytical study // *Learn. Individ. Differ.* 2013. V. 23. P. 1–9.
 137. Zabelina D., Saporta A., Beeman M. Flexible or leaky attention in creative people? Distinct patterns of attention for different types of creative thinking // *Mem. Cognit.* 2016. V. 44. P. 488–498.
 138. Zanto T.P., Toy B., Gazzaley A. Delays in neural processing during working memory encoding in normal aging // *Neuropsychologia*. 2010. V. 48. P. 13–25.
 139. Zelazo P.D., Forston J.L., Masten A.S., Carlson S.M. Mindfulness plus reflection training: Effects on executive function in early childhood // *Front. Psychol.*, 2018. doi 10.3389/fpsyg.2018.00208
 140. Zhang L., Qiao L., Chen Q. et al. Gray matter volume of the lingual gyrus mediates the relationship between inhibition function and divergent thinking // *Frontiers in Psychology*. 2016. V. 7. № 1532. doi 10.3389/fpsyg.2016.01532
 141. Zinke K., Zeintl M., Rose N.S., Putzmann J., Pydde A., Kliegel M. Working memory training and transfer in older adults: effects of age, baseline performance, and training gains // *Dev. Psychol.* 2014. V. 50. P. 304–315.
 142. Zmigrod S., Zmigrod L., Hommel B. Zooming into creativity: individual differences in attentional global-local biases are linked to creative thinking // *Front. Psychol.* 2015. V. 6. № 1647.

Inhibitory Brain Functions and Age-Associated Specificities in Organization of Cognitive Activity

O. M. Razumnikova^{a, b, *}, E. I. Nikolaeva^c

^a*Novosibirsk State Technical University, 630073, Novosibirsk, Russia*

^b*Scientific Research Institute of Physiology and Basic Medicine, 630117, Novosibirsk, Russia*

^c*Herzen State Pedagogical University of Russia, 191186, Sankt-Peterburg, Russia*

*E-mail: razoum@mail.ru

Received July 20, 2018

The review considers age-associated specificities in the functional role of brain inhibitory functions in controlling the selection and storage of information, in learning, behavior management, cognitive flexibility and the realization of creative abilities. Inhibition control as the ability of aimed selection of information and vo-

litional regulation of behavior develops in the period of 3–6 years due to the formation of neural systems of the frontal cortex, providing information transfer between the prefrontal regions and specialized cortical and subcortical brain structures which performing motor or speech operations. It is shown that the successful development of inhibitory functions is a predictor of academic achievement in school education and the best indicators of physical and mental health in adulthood. The weakening of the inhibitory control due to the atrophy of neural brain systems during aging is proposed as the basic component of the deficit of cognitive functions and loss of adaptive reserves. Along with this, a decrease in the functional fixation of an object due to the reduction in inhibition control can contribute to the effectiveness of divergent thinking and be a resource of creativity and/or prevention of cognitive dysfunction in the elderly. Alternative hypotheses of the organization of creative thinking involving mechanisms of inhibitory processes are considered: the importance of a defocused attention that facilitates switching from one idea to another or the interaction of the functions of the brain's default systems and an executive behavior control system which determines the choice of original solving the problem.

Keywords: inhibitory control, information selection strategies, memory, ontogenesis, learning, creativity