

Возможности методов нейровизуализации и нейростимуляции для развития теории системной динамической локализации высших психических функций

Я.Р. Паникратова

Научный центр психического здоровья (ФГБНУ НЦПЗ), г. Москва, Российская Федерация
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5698-4251>, e-mail: panikratova@mail.ru

Р.М. Власова

Университет Северной Каролины, г. Чапел-Хилл, США
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6455-8949>, e-mail: rosavlas@gmail.com

И.С. Лебедева

Научный центр психического здоровья (ФГБНУ НЦПЗ), г. Москва, Российская Федерация
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0649-6663>, e-mail: irina.lebedeva@ncpz.ru

В.Е. Сеницын

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова
(ФГБОУ ВО «МГУ имени М.В.Ломоносова»), г. Москва, Российская Федерация
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5649-2193>, e-mail: vsini@mail.ru

Е.В. Печенкова

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
(ФГАОУ ВО «НИУ ВШЭ»), г. Москва, Российская Федерация;
Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова
(ФГБОУ ВО «МГУ имени М.В.Ломоносова»), г. Москва, Российская Федерация
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3409-3703>, e-mail: evp@virtualcoglab.org

Теория системной динамической локализации высших психических функций была разработана Л.С. Выготским и А.Р. Лурией на основе данных, полученных с помощью оригинального метода — синдромного анализа нарушений высших психических функций у пациентов с локальными поражениями головного мозга. В период разработки этой теории аппаратные методы изучения головного мозга еще только зарождались. Хотя в более поздние годы А.Р. Лурия и его ученики указывали на важность применения таких методов для дальнейшего развития отечественной нейропсихологии, они до сих пор редко используются в работах последователей этих ученых. В данной статье мы обсудим возможности применения неинвазивных и наиболее доступных в России методов нейровизуализации (структурная, диффузионно-взвешенная и функциональная магнитно-резонансная томография) и нейростимуляции (транскраниальная магнитная стимуляция) для ответов на интересующие нейропсихологов исследовательские вопросы, а также опишем возможные планы нейропсихологических исследований с участием пациентов с локальными поражениями головного мозга и здоровых людей.

Ключевые слова: нейропсихология, Лурия, нейровизуализация, нейростимуляция, теория системной динамической локализации ВПФ, структурная МРТ, диффузионно-взвешенная МРТ, функциональная МРТ, транскраниальная магнитная стимуляция.

Финансирование. Работа выполнена в рамках гос. задания МНОЦ МГУ по теме 121061800148-2.

Благодарности. Авторы благодарят Т.В. Ахутину и Е.Г. Абдуллину за плодотворное обсуждение изложенных в статье идей.

Для цитаты: Паникратова Я.Р., Власова Р.М., Лебедева И.С., Сеницын В.Е., Печенкова Е.В. Возможности методов нейровизуализации и нейростимуляции для развития теории системной динамической локализации высших психических функций // Культурно-историческая психология. 2022. Том 18. № 3. С. 70–80. DOI: <https://doi.org/10.17759/chp.2022180310>

Scope and Perspectives of Neuroimaging and Neurostimulation to Develop the Theory of Systemic and Dynamic Localization of Higher Mental Functions

Yana R. Panikratova

Mental Health Research Center, Moscow, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5698-4251>, e-mail: panikratova@mail.ru

Roza M. Vlasova

University of North Carolina, Chapel Hill, the USA

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6455-8949>, e-mail: rosavlas@gmail.com

Irina S. Lebedeva

Mental Health Research Center, Moscow, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0649-6663>, e-mail: irina.lebedeva@ncpz.ru

Valentin E. Sinitsyn

Medical Research and Education Center of Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5649-2193>, e-mail: vsini@mail.ru

Ekaterina V. Pechenkova

HSE University, Moscow, Russia; Medical Research and Education Center of Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3409-3703>, e-mail: evp@virtualcoglab.org

The theory of systemic and dynamic localization of higher mental functions by Lev Vygotsky and Alexander Luria was based on the data obtained via an original method, syndrome analysis of deficits of higher mental functions in patients with local brain injury. When this theory was being constructed, technical methods for brain investigation were only in their early stages. Although in later years Luria and his disciples pointed out that such methods were prominent for further development of Soviet/Russian neuropsychology, they are still rarely used by the followers of these scientists. In this article, we focus on neuroimaging and neurostimulation methods that are both noninvasive and the most accessible in Russia: structural, diffusion-weighted, and functional magnetic resonance imaging, as well as transcranial magnetic stimulation. We discuss their scope and perspectives for addressing research questions in neuropsychology and describe possible designs for neuropsychological studies in patients with local brain injury and healthy individuals.

Keywords: neuropsychology, Luria, neuroimaging, neurostimulation, theory of systemic and dynamic localization of higher mental functions, structural MRI, diffusion-weighted MRI, functional MRI, transcranial magnetic stimulation.

Funding. The reported study was supported by the state assignment for Medical Research and Education Center of Lomonosov Moscow State University, project 121061800148-2.

Acknowledgements. The authors are grateful to Tatiana Akhutina and Ekaterina Abdullina for the fruitful discussion of the ideas presented in the article.

For citation: Panikratova Ya.R., Vlasova R.M., Lebedeva I.S., Sinitsyn V.E., Pechenkova E.V. Scope and Perspectives of Neuroimaging and Neurostimulation to Develop the Theory of Systemic and Dynamic Localization of Higher Mental Functions. *Kul'turno-istoricheskaya psikhologiya = Cultural-Historical Psychology*, 2022. Vol. 18, no. 3, pp. 70–80. DOI: <https://doi.org/10.17759/chp.2022180310>

Введение

Нейропсихология как отрасль научного знания начала формироваться задолго до второй половины XX в., когда стали активно развиваться технические средства изучения строения и функционирования головного мозга. В течение долгого времени исследова-

телям были доступны в основном методы, связанные с локальными поражениями мозга, — как в экспериментах на животных, так и в ходе клинических наблюдений за пациентами, точное расположение поражений у которых определялось уже *post mortem*. С 1930-х гг. в арсенал ученых также добавилось внутриоперационное картирование по методике У. Пенфилда.

Одним из ключевых теоретических вопросов нейрпсихологии была и является проблема локализации психических процессов в головном мозге человека. Важным этапом ее разработки стала теория системной динамической локализации (ТСДЛ) высших психических функций (ВПФ), предложенная в рамках отечественной нейрпсихологии Л.С. Выготским и А.Р. Лурией. Она стала ответом на полемику ученых XVIII—XIX вв. — представителей узкого локализационизма и эквипотенциализма: первые предлагали непосредственно соотносить отдельные психические процессы (или «способности») с мозговыми «центрами», а вторые настаивали на равнозначности вклада различных областей мозга в психические процессы. Ни одна из этих точек зрения не могла непротиворечиво объяснить накапливающиеся эмпирические данные [см. обзор: 6].

ТСДЛ также основана на данных, полученных на модели локальных поражений мозга человека. Их расположение обычно определялось прижизненно на основе относительного расположения повреждений черепа при проникающих ранениях или по результатам нейрохирургического вмешательства. Однако в этой теории были пересмотрены понятие функции (того, что подлежит локализации) и принципы ее локализации. Также было введено понятие ВПФ — сложных самоорганизующихся процессов в деятельности человека (мышление, речь, восприятие и др.), опосредованных знаками, произвольных и имеющих социальное происхождение. ТСДЛ строится на двух основных принципах.

Принцип системности предполагает, что каждая ВПФ является функциональной системой, состоящей из совокупности звеньев, каждое из которых вносит собственный вклад в реализацию ВПФ и обеспечивается работой определенных мозговых структур. Следовательно, ВПФ может нарушаться при дефиците в функционировании любого ее звена, а характер нарушений зависит от локализации поражения. Звено ВПФ, т. е. структурно-функциональная единица, характеризуемая определенным типом функционирования определенной зоны мозга, получило название нейрпсихологического фактора. Таким образом, основная задача нейрпсихологии в рамках ТСДЛ уточняется через понятие ВПФ и представляет собой изучение их мозговой организации, т. е. вклада различных областей и структур головного мозга в обеспечение звеньев ВПФ.

С принципом системности тесно связан основной метод отечественной нейрпсихологии, разработанный А.Р. Лурией, — синдромный анализ, на основе которого и получены данные, лежащие в основе ТСДЛ. Он заключается в том, что обследуемому предлагается набор задач, направленных на изучение комплекса психических процессов, затем проводится качественная квалификация нейрпсихологических симптомов (нарушений ВПФ) с целью обнаружения общего основания (фактора), патологическое изменение которого объясняет происхождение этих симптомов. Нарушение фактора и обусловленное им закономерное сочетание симптомов представляет со-

бой нейрпсихологический синдром. Пока аппаратные методы диагностики поражений мозга не были доступны, но данные о соотношении поражений с нарушением звеньев ВПФ уже были накоплены, синдромный анализ использовался для топической диагностики — определения расположения поражения (например, для планирования операций) и для функционального диагноза — квалификации состояния ВПФ, в частности, определения иерархической структуры нарушений. Сейчас синдромный анализ используется в практике и исследованиях только для функционального диагноза.

Принцип системности можно проиллюстрировать на примере функциональной роли некоторых областей головного мозга в обеспечении речи у правшей [2; 6; 12]. Левая нижняя лобная извилина связана с моторным и синтаксическим программированием речи; левые лобные области, расположенные впереди от нее, — с созданием замысла высказывания, построением внутрениречевой схемы предложения и текста. Задняя часть верхней височной извилины обеспечивает фонематический анализ и синтез; средняя височная извилина — достаточный объем слухоречевой памяти, выбор звуковой формы слова; задненижние височные области — хранение зрительных образов слов; нижние отделы постцентральной извилины — кинестетические аспекты артикуляции; височно-теменно-затылочные области — понимание логико-грамматических конструкций, выбор значений слов. Правое полушарие в большей степени участвует в реализации прагматических аспектов речи (например, понимание контекста [1]). Роль подкорковых структур связана с обеспечением энергетических аспектов речи: темпа, фонации, речевой активности.

Второй принцип, сформулированный в рамках ТСДЛ, — принцип динамической организации ВПФ, — предполагает, что ВПФ и обеспечивающие их мозговые функциональные системы могут перестраиваться. Во-первых, структура ВПФ изменяется в онтогенезе и по мере автоматизации. Например, у первоклассника письмо нагружает зрительные и зрительно-пространственные, моторные, слуховые и кинестетические функции, а у старшеклассника технические операции автоматизируются и максимальная нагрузка падает на смысловую организацию содержания письма [3]. Во-вторых, ВПФ могут перестраиваться в зависимости от условий и способа выполнения задачи за счет своих вариативных звеньев, которые выделяются в структуре ВПФ наряду с инвариантными (постоянными, критически важными). Например, понимание речи собеседника в ситуации, когда рядом множество людей громко говорят на свои темы, требует отторгивания интерферирующих сообщений, а в спокойной обстановке этот дополнительный механизм для понимания речи не требуется. В-третьих, возможность перестроения ВПФ существует при поражениях головного мозга [11]. При внутрисистемных перестройках ВПФ начинает осуществляться с опорой на сохраненные ее звенья: например, нарушения письма из-за дефицита фонематического анализа и синтеза могут

частично компенсироваться за счет кинестетического звена (проговаривание вслух). Межсистемные перестройки предполагают, что в ВПФ включаются звенья из других функциональных систем: например, для восстановления зрительного восприятия букв может использоваться актуализация их моторного образа.

Проследивание динамических перестроек мозговой организации ВПФ требует сравнения структурных и функциональных характеристик мозга у одного и того же человека в ходе прижизненного лонгитюда или хотя бы между группами людей, у которых предполагаемая перестройка осуществилась или нет. До разработки неинвазивных методов изучения мозга это было невозможно.

Развитие таких методов должно было существенным образом обогатить нейропсихологию. Как пишет Е.Д. Хомская, «В экспериментальной нейропсихологии по инициативе А.Р. Лурии было создано еще одно новое направление, которое можно обозначить как психофизиологическое. <...> А.Р. Лурия считал важнейшей задачей создание “психологически ориентированной физиологии”, т. е. психофизиологии, изучающей сложные сознательные произвольно регулируемые формы психической деятельности» [10, с. 25]. Так, А.Р. Лурия и Е.Д. Хомская применяли в своих исследованиях электроэнцефалографию. Также Е.Д. Хомская отмечала, что дальнейшая разработка проблем отечественной нейропсихологии связана с «...такими моментами, как развитие современных аппаратных методов диагностики локальных поражений головного мозга (компьютерной томографии, методов ядерно-магнитного резонанса и др.)» [10, с. 23].

Однако на протяжении долгого времени методы нейровизуализации, на которые указывала Е.Д. Хомская, играли для нейропсихологии исключительно техническую роль по уточнению индивидуального расположения локальных поражений (и заодно сняли со специалистов задачу проведения топической диагностики). Исследовательские возможности этих методов за 45 лет после смерти А.Р. Лурии так и остались практически не востребуемыми со стороны ТСДЛ и все еще недостаточно интегрированы в отечественную нейропсихологию.

Далее мы рассмотрим возможности применения методов нейровизуализации и нейростимуляции в нейропсихологических исследованиях. Мы сконцентрируемся на неинвазивных методах, наиболее доступных в России и представляющих нам наиболее важными для развития ТСДЛ: магнитно-резонансная томография (МРТ: структурная (сМРТ), диффузионно-взвешенная (дМРТ)), функциональная (фМРТ) и транскраниальная магнитная стимуляция (ТМС). Мы обсудим возможные планы (дизайны) исследований с участием пациентов с локальными поражениями головного мозга и здоровых людей, которые могут информировать нейропсихологическую теорию в различных ее аспектах.

Структурная МРТ

Структурная МРТ позволяет получить изображения мозга, на которых его ткани (серое и белое вещество, спинномозговая жидкость) различаются по интенсивности пикселей и вокселей¹ на серой шкале благодаря разным магнитным характеристикам водорода в составе разных молекул. С помощью сМРТ локализация поражения может быть определена с точностью до долей миллиметра, поэтому ни одно новое описание важного с точки зрения нейропсихологии клинического случая не обходится без сМРТ [29]. Примечательно также, что сМРТ добавляет много новой информации к пониманию классических случаев. Так, анализ МР-изображений препаратов головного мозга двух знаменитых пациентов П. Брока показал, что поражения у них распространялись не только на область левой нижней лобной извилины (зона Брока), но и на островковую кору и верхний продольный пучок [20].

Аналогичные данные о роли поражений в островке в нарушении порождения речи были получены и другим методом, который является естественным продолжением нейропсихологических исследований на традиционной модели локальных поражений на новом техническом уровне. Этот метод — воксельное сопоставление поражения и симптома (voxel-based lesion-symptom mapping, VLSM [14]) — позволяет соотнести количественные нейропсихологические данные с данными о локализации поражения в больших группах пациентов. Изображения сМРТ вручную или автоматически размечаются так, что получается бинарная трехмерная маска мозга, в которой воксели, соответствующие здоровой ткани мозга, имеют значение 0, а пораженной — 1. Далее проводится статистический анализ для каждого вокселя: группа пациентов, у которых он поврежден, сравнивается по нейропсихологическому показателю с группой, не имеющей повреждений. В итоге может быть сделан вывод о том, поражение каких областей мозга вносит вклад в тяжесть интересующего симптома. В VLSM также разработана процедура проверки того, поражение какой из двух областей мозга является первичным для возникновения симптома, поскольку, особенно при сосудистых поражениях, соседние структуры часто поражаются сочетанно (например, нижняя лобная извилина и островок), что может привести к неверным выводам. Так, в полном соответствии с данными сМРТ на препаратах мозга пациентов Брока, методом VLSM на большой группе пациентов было показано, что поражение нижней лобной извилины само по себе приводит к нарушениям беглости речи с гораздо меньшей вероятностью, чем поражения в переднем островке, которые так долго оставались невыявленными [14].

Структурная МРТ может применяться и в исследованиях интактного мозга. Здесь может быть

¹ Воксел — базовый элемент трехмерного МР-изображения мозга.

использован такой метод, как морфометрия. Самые технически простые, но трудоемкие для специалиста методики заключаются в ручной сегментации структур мозга по МР-изображениям с последующим анализом их объема. Повоксельная морфометрия (voxel-based morphometry), позволяющая оценить объем серого и белого вещества в каждом вокселе, полностью автоматизирована и была долгое время популярна из-за относительной простоты выполнения, но она подвергается серьезной критике из-за искажений результатов, связанных с возможностью недостаточной хорошей пространственной корегистрации изображений мозга друг к другу, а также невозможностью понять причину межгрупповых различий: атрофия ткани, наличие большего количества борозд, увеличение площади извилин или же толщины коры [15; 36]. Эти ограничения позволяют преодолеть поверхностная морфометрия (surface-based morphometry), оценивающая толщину, площадь и складчатость различных областей коры. Существуют также методы анализа объема подкорковых структур [24].

Возможными планами исследований с применением морфометрии являются корреляционные, предполагающие поиск связей морфометрических показателей с нейропсихологическими. Например, было показано, что объем серого вещества и складчатость коры в вентромедиальной, вентролатеральной и дорсолатеральной префронтальной коре предсказывали состояние трех компонентов регуляторных функций соответственно — общего, переключения и рабочей памяти [34]. Также возможны экспериментальные планы исследований, в которых объем структуры измеряется до и после воздействия: обучения, направленного на развитие интересующей функции в экспериментальной группе, и других занятий в контрольной группе. Например, было показано, что тренировки рабочей памяти увеличивают складчатость коры в теменных областях [37].

Диффузионно-взвешенная МРТ

Данный метод основан на измерении направления диффузии молекул воды в тканях головного мозга в условиях магнитного поля при проведении МРТ. Поскольку волокна белого вещества организованы в сонаправленные пучки, в них диффузия молекул воды будет происходить преимущественно вдоль, а не поперек волокон. Самая простая математическая модель для описания диффузии воды в тканях — тензорная², она же и дает название одному из вариантов дМРТ — диффузионно-тензорная МРТ. В рамках этой модели диффузия описывается тремя собственными векторами (направление

диффузии) и тремя собственными значениями (величина диффузии в определенном направлении). Эти показатели или их комбинации могут нести информацию о состоянии белого вещества головного мозга. Так, аксиальная диффузия — значение самого большого вектора — отражает диффузию вдоль нервных волокон, снижается при повреждении аксонов и возрастает по мере созревания мозга в онтогенезе. Радиальная диффузия — среднее двух векторов с меньшими значениями — описывает поперечно направленную диффузию и чувствительна к процессу миелинизации; ее величина снижается в онтогенезе и увеличивается при нейродегенеративных заболеваниях. Показатель фракционной анизотропии отражает степень анизотропности (неоднородности направлений) диффузии молекул воды в каждом вокселе³ и чувствителен к любым изменениям в белом веществе, но при этом является неспецифическим; для точной его интерпретации необходим учет показателей радиальной и аксиальной диффузии [13]. Модели диффузии позволяют проводить трактографию — 3D-реконструкцию трактов белого вещества.

Использование дМРТ позволяет дополнить структурно-функциональную модель мозга, существующую в рамках ТСДЛ, данными о функциональной роли трактов белого вещества. Это может быть сделано с помощью соотнесения повреждений трактов с нейропсихологическими симптомами [26] или анализа корреляций показателей состояния белого вещества в определенных трактах и нейропсихологических показателей у здоровых испытуемых [28]. Проблеме вклада структурных связей мозга в обеспечение психических процессов в отечественной нейропсихологии уделялось недостаточно внимания (за исключением роли мозолистого тела в межполушарном взаимодействии при реализации различных ВПФ [например: 5]). Это может быть связано с тем, что в период создания ТСДЛ были недоступны методы индивидуального исследования трактов белого вещества при жизни, а их выявление в посмертных препаратах было трудоемким и требующим высокой квалификации. Однако именно тракты белого вещества являются инфраструктурой, позволяющей отдельным структурам серого вещества объединяться в функциональные системы. Поражение трактов и даже отдельных их сегментов приводит к определенным симптомам (например, семантические парафазии при поражении нижнего лобно-затылочного пучка и фонологические парафазии при поражении дугообразного пучка [21]), поэтому исследование структурно-функциональной организации белого вещества не должно оставаться за рамками нейропсихологических исследований.

² Более сложные модели диффузии, например, функция распределения ориентации диффузии, позволяют преодолеть ограничения тензорной модели [22].

³ Диффузия считается изотропной, если собственные значения практически равны между собой, и анизотропной, если одно из значений выше остальных.

Функциональная МРТ

Функциональная МРТ — метод функционального картирования головного мозга, обладающий достаточно высоким пространственным разрешением (обычно 2–3 мм). Он основан на явлении нейроваскулярного сопряжения, благодаря которому усиление метаболизма нейронов при их активации приводит к увеличению локального мозгового кровотока и изменению соотношения окси- и дезоксигемоглобина в венозной крови. Последнее может быть зафиксировано МР-томографом в виде локального изменения релаксационных свойств крови при МРТ, что приводит к изменениям интенсивности пикселей и вокселей на T2*-взвешенных изображениях. Эта методика получила название BOLD (blood oxygenation level dependent — зависимость от уровня оксигенации крови) фМРТ.

Наиболее частое применение фМРТ в научных исследованиях — изучение мозговой активации здоровых людей при выполнении задач. Особый интерес для нейропсихологии представляет разработка задач, нагружающих определенные нейропсихологические факторы, — этого до сих пор не делалось. Для получения активации, специфической для каждого психического процесса, необходимо использовать как минимум две задачи, основную и контрольную. Контрольное условие должно отличаться от основного лишь по содержанию изучаемого процесса: например, основным условием задачи для изучения семантической обработки речи может быть чтение предложений, а контрольным — чтение слогов; или прослушивание аудиокниги в качестве основного условия и той же записи, прокрученной задом наперед, в качестве контрольного условия [9].

Значимыми для нейропсихологии возможностями фМРТ являются изучение возрастных изменений [например: 30] и индивидуальных особенностей мозгового обеспечения ВПФ. Важность второго обусловлена большой межличностной вариативностью локализации ВПФ (например, речь [23], регуляторные функции [33]).

В рамках ТСДЛ, фМРТ позволяет выявить функциональные сети, включающие инвариантные и вариативные звенья ВПФ. Однако в отличие от исследований на модели поражения с применением сМРТ и дМРТ, инвариантные звенья по данным активации вычленивать трудно, поскольку само по себе наличие локальной активации не свидетельствует о том, что эта активация необходима для реализации функции. Для выявления инвариантных звеньев используется, в частности, комбинированный анализ задач: обследуемому предлагается выполнить несколько задач, направленных на изучение одного и того же психического процесса, и инвариантные компоненты, предположительно, будут присутствовать на всех картах активации [9]. Например, общие компоненты активации для задач, нагружающих оттормаживание [17; 25], обнаруживаются в левой дорсолатеральной префронтальной и правой островковой коре, поясной и нижних лобных извилинах. Активация в левой вер-

темовидной извилине только в тесте Струпа может быть связана с необходимостью распознавания слов, а активация компонентов вентральной сети внимания только в задаче Go/No-go — с необходимостью детекции неожиданного важного стимула.

Помимо активации мозга, фМРТ предоставляет важнейшую для нейропсихологии возможность изучения функциональных связей (ФС), с помощью которых отдельные области головного мозга «...становятся звеньями единой функциональной системы» [7, с. 78]. В ТСДЛ идея о функциональной интеграции различных областей головного мозга является ключевой: «...высшие психические функции могут существовать только благодаря взаимодействию высоко дифференцированных мозговых структур, каждая из которых вносит свой специфический вклад в динамическое целое и участвует в функциональной системе на своих собственных ролях» [6, с. 33]. Синдромный анализ, в отличие от фМРТ, не позволяет выявить изменение ФС между звеньями функциональной системы, а лишь дает возможность предположить нарушение ФС из-за дефицита определенного звена.

Технически ФС по фМРТ определяются как мера статистической взаимосвязи (корреляции) низкочастотных (<0,1 Гц) колебаний BOLD-сигнала в различных областях мозга и подкорковых структурах. ФС могут изучаться не только при выполнении задачи, но и в состоянии покоя — в этом случае, предположительно, анализируется так называемая «внутренняя» (intrinsic) функциональная архитектура мозга. Так, на основе данных фМРТ покоя выделяются такие сети, как фронто-париетальная, дефолтная, дорсальная и вентральная сети внимания [38]. Для нейропсихологии здесь наиболее интересен поиск ассоциаций между результатами обследования вне томографа и показателями ФС в покое. Например, было показано, что ФС дорсолатеральной префронтальной коры с различными областями мозга ассоциированы с состоянием переключения, оттормаживания и вербального компонента регуляторных функций [32]. Аналогичным образом могут анализироваться корреляции нейропсихологических параметров с показателями ФС или активации при выполнении задачи. Также перспективным представляется использование в одном и том же исследовании сМРТ у пациентов с поражениями мозга для выявления областей, критически важных для реализации определенной функции, и затем фМРТ в группе нормы для выявления ФС этих областей (lesion network mapping [16]).

Исследования активации или ФС при выполнении задачи и ФС в покое могут проводиться и на выборке пациентов с локальными поражениями мозга — с целью изучения компенсаторных перестроек структурно-функциональной организации мозга при развитии патологии или в ходе нейропсихологической реабилитации. Идеальный вариант таких исследований предполагает лонгитюдный дизайн: последующие данные должны быть получены в одних и тех же условиях для каждого пациента до, в процессе и после реабилитации или до и после начала болезни.

Поскольку второй вариант можно реализовать только в условиях масштабных скрининговых исследований, более осуществимым дизайном исследования становится сопоставление активации или ФС в клинической группе с соответствующими показателями в группе нормы, а также поиск корреляций между нейрофизиологическими и нейропсихологическими показателями [35].

ТМС

Метод ТМС определяется воздействием переменного магнитного поля, генерируемого специальной катушкой (coil), на выбранную область головного мозга. Глубина воздействия составляет до 2–3 см, с применением определенных катушек — до 6 см. Для выбора области воздействия могут использоваться данные сМРТ и фМРТ. В зависимости от параметров стимуляции в данной области происходит фасилитация или угнетение нейронной активности. Возможно даже получение так называемого виртуального поражения определенного участка мозга у здорового человека — нарушения функции стимулируемого участка, которое похоже на симптомы настоящего поражения, но длится всего несколько секунд и полностью обратимо [4]. Пока непосредственный эффект ТМС (тормозный или возбуждающий) сохраняется, исследователь может сравнить выполнение заданий с тем, как тот же самый человек выполнял похожие задания без стимуляции, при стимуляции другой области мозга или при плацебо-стимуляции (sham), которая воспроизводит звуковые и тактильные ощущения от ТМС, но не воздействует на мозг [4].

Также интерес для нейропсихологии могут представлять исследования, демонстрирующие улучшение выполнения задач у здоровых людей под воздействием ТМС [18] и возможности терапии когнитивных нарушений при локальных поражениях головного мозга [31].

Общее обсуждение и выводы

Как видно из приведенного краткого обзора, методы нейровизуализации и нейростимуляции могут успешно служить задаче изучения мозговой организации ВПФ как многокомпонентных функциональных систем с инвариантными и вариативными звеньями и дополнять информацию, которую нейропсихолог может получить посредством синдромного анализа, с точки зрения мозговых явлений. Данные методы могут использоваться и для решения более частных задач нейропсихологии — изучения структурно-функциональных перестроек ВПФ в онтогенезе, при локальных поражениях мозга или в результате нейропсихологической реабилитации, а также для исследования индивидуальных различий мозгового обеспечения ВПФ. Методы нейровизуализации обладают высокой пространственной точностью, которой невозможно было добиться во

времена разработки ТСДЛ, и открывают важнейшие для нейропсихологии возможности изучения функциональных (фМРТ) и структурных (дМРТ) связей головного мозга.

Предложенные в данной статье примеры применения методов нейровизуализации и нейростимуляции в нейропсихологических исследованиях обобщены в таблице.

Исследования интактного мозга позволяют преодолеть ряд принципиальных проблем, возникающих при обследовании пациентов с локальными поражениями мозга. Самая главная из них — побочные переменные в виде общемозговых факторов поражения, всегда сопутствующих мозговой патологии: изменения сосудистого кровообращения, ликвородинамики, воспалительные процессы и гипертензионно-дислокационные явления, приводящие к изменению динамики нервных процессов, нарушению соотношения процессов возбуждения и торможения [6]. Кроме того, обследование здоровых людей открывает большие возможности для изучения функций подкорковых структур мозга, поскольку у пациентов с локальными поражениями такие исследования осложнены высокой летальностью, изменениями состояния сознания [6] и грубыми моторными симптомами, порой маскирующими когнитивные. Наконец, достаточное для анализа количество здоровых людей набрать значительно легче, чем несколько клинических групп, однородных по полу, возрасту, уровню образования, локализации, объему и этиологии поражения и времени, прошедшему с начала заболевания.

Важным исследовательским вопросом является характер гипотез, которые описанные нами планы исследования позволяют проверить. Для нейропсихологии одной из ключевых является каузальная гипотеза вида «функционирование участка мозга (X) необходимо для реализации звена ВПФ (Y)». Большинство дизайнов исследований интактного мозга (2, 4, 6, 8, 10; таблица) допускают проверку лишь гипотез вида «X связано с Y», но не обязательно является для Y необходимым. Изучение локальных поражений мозга (1, 3) приближает исследователей к выявлению «X, необходимого для Y», однако в этом случае доступны только квазиэкспериментальные планы исследований: исследователь не может контролировать, кому и когда предъявляются разные уровни независимой переменной (поражение/его отсутствие), не имеет полной информации о последствиях поражения для мозга (например, диализ и процессы нейропластичности) и возможности оценить психические функции до поражения. Следовательно, строго говоря, проверка каузальной гипотезы невозможна и здесь. Совместная интерпретация данных, полученных на моделях поражения и здорового мозга, позволяет делать более «сильные» выводы, чем на основании каждой из моделей по отдельности [19]. ТМС (12), в свою очередь, позволяет проверить гипотезу о каузальных связях между функционированием ряда областей коры мозга и компонентами ВПФ с помощью истинного эксперимента, в котором контролируется независимая переменная (воздей-

Дизайны нейропсихологических исследований с применением методов
 нейровизуализации и нейростимуляции

Метод	Объект исследования	Дизайн исследования	Нейропсихологическая проблематика
сМРТ	Локальные поражения	1. Повоксельное сопоставление данных о тяжести симптома между группами с поражением и без поражения мозга в данном вокселе (VLSM)	Локализация инвариантных звеньев ВПФ и функциональная роль трактов
	Интактный мозг	2. Корреляции морфометрических показателей с данными о состоянии функции и сопоставление этих корреляций между группами/полушариями	Функциональная роль областей серого вещества, индивидуальные и возрастные различия, межполушарная асимметрия
дМРТ	Локальные поражения (3), интактный мозг (4)	3, 4. Корреляции показателей состояния трактов с данными нейропсихологической диагностики и сопоставление этих корреляций между группами/полушариями	3, 4. Функциональная роль трактов. 4. Индивидуальные и возрастные различия, межполушарная асимметрия
фМРТз	Локальные поражения (5, 7), интактный мозг (6, 8)	5, 6. Изучение активации или ФС головного мозга при выполнении задачи 7, 8. Корреляции показателей активации или ФС при выполнении задачи с данными нейропсихологической диагностики и сопоставление этих корреляций между группами или в динамике	6, 8. Локализация инвариантных + вариативных звеньев ВПФ, межполушарное взаимодействие, индивидуальные и возрастные различия в ФС, в объеме активации и локализации ВПФ. 5, 7. Компенсаторные перестройки структурно-функциональной организации мозга при патологии/в результате реабилитации
фМРТп	Локальные поражения (9), интактный мозг (10)	9, 10. Корреляции показателей ФС в покое с данными нейропсихологической диагностики и сравнение этих корреляций в разных группах/условиях или в динамике	9. Компенсаторные перестройки. 10. Вклад ФС в обеспечение ВПФ, индивидуальные и возрастные различия
сМРТ, дМРТ, фМРТз, фМРТп	Интактный мозг	11. Сравнение показателей МРТ в экспериментальной группе (обучение, направленное на развитие функции) и контрольной группе (другие занятия), до и после экспериментального вмешательства	Перестройки функциональных систем в процессе обучения
ТМС	Интактный мозг	12. Описание нарушений ВПФ при виртуальных поражениях областей головного мозга в ходе выполнения задачи по сравнению с плацебо-стимуляцией	Локализация инвариантных звеньев ВПФ
		13. Сравнение эффектов стимуляции областей мозга, направленной на улучшение выполнения задачи, с плацебо-стимуляцией	Функциональная роль ряда областей коры головного мозга, межполушарная асимметрия, пластичность ВПФ в норме
	Локальные поражения	14. Описание эффектов стимуляции областей мозга для терапии нарушений ВПФ по сравнению с плацебо-стимуляцией	Компенсаторные перестройки

Примечание: фМРТз – фМРТ, связанная с задачей; фМРТп – фМРТ покоя.

стве). Дизайны 11, 13, 14 позволяют проверять каузальные гипотезы, но другие: об изменении области мозга или перестройке функциональных систем под влиянием обучения, направленного на улучшение определенной ВПФ (11), об участии области мозга в пластичности ВПФ в норме (13) или в компенсаторных перестройках ВПФ (14).

Важная проблема, с которой столкнутся ученые при проведении исследований с дизайнами 1–4, 7–10, связана с необходимостью представления нейропсихологических данных в количественных шкалах. Для изучения локализации нейропсихологических факторов потребуется разработка интегративных количественных индексов, отражающих их состояние, что требует значительного осмысления в связи с многозначностью симптома: один и тот же

симптом может быть связан с нарушением различных факторов. Например, нарушение номинации может происходить из-за дефицита зрительного гнозиса, речевых или регуляторных трудностей. В значительной степени эта проблема может быть решена с помощью разработки дробной классификации ошибок в каждой пробе по характеру нарушений и оценки результатов обследования квалифицированными опытными нейропсихологами. Другая трудность – субъективность синдромного анализа – может быть преодолена с помощью разработки четко сформулированных критериев оценки. В рамках отечественной детской нейропсихологии уже была разработана система количественной оценки нейропсихологического обследования группой Т.В. Ахутиной. Эта система представляет собой

сложное сочетание качественной квалификации симптома и присвоения ему балла в соответствии с его тяжестью [8] и позволяет в итоге от отдельных симптомов перейти к интегративным индексам регуляторных функций, серийной организации движений и речи, переработки кинестетической, слуховой, зрительной и зрительно-пространственной информации, а также индексам гиперактивности/импульсивности и утомляемости/замедленности [27]. Состав этих индексов основан на теоретических соображениях, опыте синдромного анализа и результатах конфирматорного факторного анализа.

Литература

1. Ахутина Т.В. Роль правого полушария в построении текста // Психолінгвістика. 2009. № 3. С. 10–28.
2. Ахутина Т.В. Порождение речи: Нейролингвистический анализ синтаксиса. М.: Librokom, 2019. 218 с.
3. Ахутина Т.В. и др. Преодоление трудностей учения: нейропсихологический подход. СПб.: Питер, 2008. 320 с.
4. Бакулин И.С. и др. Транскраниальная магнитная стимуляция в когнитивной нейронауке: методологические основы и безопасность // Российский журнал когнитивной науки. 2020. Том 7. № 3. С. 25–44. DOI:10.47010/20.3.2
5. Ковязина М.С. Нейропсихологический синдром у больных с патологией мозолистого тела: дисс. ... д-ра психол. наук. М., 2014. 358 с.
6. Лурья А.Р. Высшие корковые функции человека и их нарушения при локальных поражениях мозга. М.: МГУ, 1962. 432 с.
7. Лурья А.Р. Основы нейропсихологии. М.: Изд. Центр «Академия», 2003. 384 с.
8. Методы нейропсихологического обследования детей 6–9 лет / Под ред. Т.В. Ахутиной. М.: В. Секачев, 2016. 280 с.
9. Печенкова Е.В. и др. Прехирургическое картирование речевых зон коры головного мозга с помощью фМРТ: актуальное состояние и тенденции // Медицинская визуализация. 2022. Том 26. № 1. С. 48–69. DOI:10.24835/1607-0763-1094
10. Хомская Е.Д. Нейропсихология. СПб.: Питер, 2005. 496 с.
11. Цветкова Л.С. Афазия и восстановительное обучение. М.: Просвещение, 1988. 207 с.
12. Akhutina T. Luria's classification of aphasias and its theoretical basis // *Aphasiology*. 2015. Vol. 30. № 8. P. 878–897. DOI:10.1080/02687038.2015.1070950
13. Alexander A.L. et al. Diffusion tensor imaging of the brain // *Neurotherapeutics*. 2007. Vol. 4. № 3. P. 316–329. DOI:10.1016/j.nurt.2007.05.011
14. Bates E. et al. Voxel-based lesion-symptom mapping // *Nat Neurosci*. 2003. Vol. 6. № 5. P. 448–450. DOI:10.1038/n1050
15. Bookstein F.L. «Voxel-based morphometry» should not be used with imperfectly registered images // *Neuroimage*. 2001. Vol. 14. № 6. P. 1454–1462. DOI:10.1006/nimg.2001.0770
16. Cohen A.L. et al. Looking beyond the face area: lesion network mapping of prosopagnosia // *Brain*. 2019. Vol. 142. № 12. P. 3975–3990. DOI:10.1093/brain/awz332
17. Criaud M. et al. Have we been asking the right questions when assessing response inhibition in go/no-go tasks

Индексы формируются путем суммирования соответствующих стандартизированных показателей выполнения различных проб, таких как продуктивность и специфические ошибки.

Таким образом, богатый арсенал современных методов нейровизуализации и нейростимуляции в сочетании с методами статистического анализа данных позволяет верифицировать, уточнить и продолжить разработку сформированной в рамках ТСДЛ модели структурно-функциональной организации мозга, используя данные, собранные на материалах как локальных поражений, так и здорового мозга.

References

1. Akhutina T.V. Rol' pravogo polushariya v postroenii teksta [Role of the right hemisphere in text construction]. *Psikholingvistika [Psycholinguistics]*, 2009, no. 3, pp. 10–28. (In Russ.).
2. Akhutina T.V. Porozhdenie rechi: Neirolingvisticheskiy analiz sintaksisa [Language production: Neurolinguistic analysis of syntax]. Moscow: Librokom, 2019. 218 p. (In Russ.).
3. Akhutina T.V. et al. Preodolenie trudnostei ucheniya: neiropsikhologicheskii podkhod [Overcoming learning disabilities: a neuropsychological approach]. Saint Petersburg: Piter, 2008. 320 p. (In Russ.).
4. Bakulin I.S. et al. Transcranial magnetic stimulation in cognitive neuroscience: Methodological basis and safety. *The Russian Journal of Cognitive Science*, 2020. Vol. 7, no. 3, pp. 25–44. DOI:10.47010/20.3.2 (In Russ.).
5. Kovyazina M.S. Neiropsikhologicheskii sindrom u bol'nykh s patologiei mozolistogo tela. Diss. dokt. psikhol. nauk. [Neuropsychological syndrome in patients with corpus callosum pathology. Dr. Sci. (Psychology) diss.]. Moscow, 2014. 358 p. (In Russ.).
6. Luria A.R. Vysshie korkovye funktsii cheloveka i ikh narusheniya pri lokal'nykh porazheniyakh mozga [Higher cortical functions in man and their disturbances in patients with local brain injury]. Moscow: Lomonosov Moscow State University, 1962. 432 p. (In Russ.).
7. Luria A.R. Osnovy neiropsikhologii [Basics of neuropsychology]. Moscow: Akademiya, 2003. 384 p. (In Russ.).
8. Metody neiropsikhologicheskogo obsledovaniya detei 6–9 let [Neuropsychological assessment of 6–9-year-old children]. Akhutina T.V. (ed.). Moscow: V. Sekachev, 2016. 280 p. (In Russ.).
9. Pechenkova E.V. et al. Presurgical brain mapping of language processing with fMRI: state of the art and tendencies. *Medical Visualization*, 2022. Vol. 26, no. 1, pp. 48–69. DOI:10.24835/1607-0763-1094 (In Russ.).
10. Khomskaya E.D. Neiropsikhologiya [Neuropsychology]. Saint Petersburg: Piter, 2005. 496 p. (In Russ.).
11. Tsvetkova L.S. Afaziya i vosstanovitel'noe obuchenie [Aphasia and its neuropsychological treatment]. Moscow: Prosveshchenie, 1988. 207 c. (In Russ.).
12. Akhutina T. Luria's classification of aphasias and its theoretical basis. *Aphasiology*, 2015. Vol. 30, no. 8, pp. 878–897. DOI:10.1080/02687038.2015.1070950
13. Alexander A.L. et al. Diffusion tensor imaging of the brain. *Neurotherapeutics*, 2007. Vol. 4, no. 3, pp. 316–329. DOI:10.1016/j.nurt.2007.05.011
14. Bates E. et al. Voxel-based lesion-symptom mapping. *Nat Neurosci*, 2003. Vol. 6, no. 5, pp. 448–450. DOI:10.1038/n1050

with fMRI? A meta-analysis and critical review // *Neurosci Biobehav Rev.* 2013. Vol. 37. № 1. P. 11–23. DOI:10.1016/j.neubiorev.2012.11.003

18. Curtin A. et al. Enhancing neural efficiency of cognitive processing speed via training and neurostimulation: An fNIRS and TMS study // *Neuroimage.* 2019. Vol. 198. P. 73–82. DOI:10.1016/j.neuroimage.2019.05.020

19. D'Esposito M. et al. Functional MRI: Applications in Cognitive Neuroscience // *fMRI Techniques and Protocols. Neuromethods* / Filippi M. (ed.). N.Y.: Humana Press, 2016. P. 317–353.

20. Dronkers N.F. et al. Paul Broca's historic cases: high resolution MR imaging of the brains of Leborgne and Lelong // *Brain.* 2007. Vol. 130. Pt. 5. P. 1432–1441. DOI:10.1093/brain/awm042

21. Duffau H. et al. A re-examination of neural basis of language processing: proposal of a dynamic hodotopical model from data provided by brain stimulation mapping during picture naming // *Brain Lang.* 2014. Vol. 131. P. 1–10. DOI:10.1016/j.bandl.2013.05.011

22. Farquharson S. et al. White matter fiber tractography: why we need to move beyond DTI // *J Neurosurg.* 2013. Vol. 118. № 6. P. 1367–1377. DOI:10.3171/2013.2.JNS121294

23. Fedorenko E. et al. Broca's Area Is Not a Natural Kind // *Trends Cogn Sci.* 2020. Vol. 24. № 4. P. 270–284. DOI:10.1016/j.tics.2020.01.001

24. Fischl B. et al. Whole Brain Segmentation // *Neuron.* 2002. Vol. 33. № 3. P. 341–355. DOI:10.1016/s0896-6273(02)00569-x

25. Huang Y. et al. The Stroop effect: An activation likelihood estimation meta-analysis in healthy young adults // *Neurosci Lett.* 2020. Vol. 716. P. 134683. DOI:10.1016/j.neulet.2019.134683

26. Ivanova M.V. et al. Diffusion-tensor imaging of major white matter tracts and their role in language processing in aphasia // *Cortex.* 2016. Vol. 85. P. 165–181. DOI:10.1016/j.cortex.2016.04.019

27. Korneev A.A. et al. Elaboration of Neuropsychological Evaluation of Children: Structural Analysis of Test Results // *Psychology in Russia: State of the Art.* 2021. Vol. 14. № 4. P. 18–37. DOI:10.11621/pir.2021.0402

28. Li X. et al. White-Matter Integrity and Working Memory: Links to Aging and Dopamine-Related Genes // *eNeuro.* 2022. Vol. 9. № 2. DOI:10.1523/ENEURO.0413-21.2022

29. Lungu O. et al. Editorial: Neuropsychology Through the MRI Looking Glass // *Front Neurol.* 2020. Vol. 11. P. 609897. DOI:10.3389/fneur.2020.609897

30. Martin A. et al. Reading in the brain of children and adults: a meta-analysis of 40 functional magnetic resonance imaging studies // *Hum Brain Mapp.* 2015. Vol. 36. № 5. P. 1963–1981. DOI:10.1002/hbm.22749

31. Naeser M.A. et al. Transcranial magnetic stimulation and aphasia rehabilitation // *Arch Phys Med Rehabil.* 2012. Vol. 93. № 1. Suppl. P. S26–34. DOI:10.1016/j.apmr.2011.04.026

32. Panikratova Y.R. et al. Functional connectivity of the dorsolateral prefrontal cortex contributes to different components of executive functions // *Int J Psychophysiol.* 2020. Vol. 151. P. 70–79. DOI:10.1016/j.ijpsycho.2020.02.013

33. Shashidhara S. et al. Individual-subject Functional Localization Increases Univariate Activation but Not Multivariate Pattern Discriminability in the “Multiple-demand” Frontoparietal Network // *J Cogn Neurosci.* 2020. Vol. 32. № 7. P. 1348–1368. DOI:10.1162/jocn_a_01554

34. Smolker H.R. et al. Individual differences in regional prefrontal gray matter morphometry and fractional anisotropy

15. Bookstein F.L. “Voxel-based morphometry” should not be used with imperfectly registered images. *Neuroimage*, 2001. Vol. 14, no. 6, pp. 1454–1462. DOI:10.1006/nimg.2001.0770

16. Cohen A.L. et al. Looking beyond the face area: lesion network mapping of prosopagnosia. *Brain*, 2019. Vol. 142, no. 12, pp. 3975–3990. DOI:10.1093/brain/awz332

17. Criaud M. et al. Have we been asking the right questions when assessing response inhibition in go/no-go tasks with fMRI? A meta-analysis and critical review. *Neurosci Biobehav Rev.* 2013. Vol. 37, no. 1, pp. 11–23. DOI:10.1016/j.neubiorev.2012.11.003

18. Curtin A. et al. Enhancing neural efficiency of cognitive processing speed via training and neurostimulation: An fNIRS and TMS study. *Neuroimage*, 2019. Vol. 198, pp. 73–82. DOI:10.1016/j.neuroimage.2019.05.020

19. D'Esposito M. et al. Functional MRI: Applications in Cognitive Neuroscience. In Filippi M. (ed.), *fMRI Techniques and Protocols. Neuromethods.* N.Y.: Humana Press, 2016, pp. 317–353.

20. Dronkers N.F. et al. Paul Broca's historic cases: high resolution MR imaging of the brains of Leborgne and Lelong. *Brain*, 2007. Vol. 130, pt. 5, pp. 1432–1441. DOI:10.1093/brain/awm042

21. Duffau H. et al. A re-examination of neural basis of language processing: proposal of a dynamic hodotopical model from data provided by brain stimulation mapping during picture naming. *Brain Lang.* 2014. Vol. 131, pp. 1–10. DOI:10.1016/j.bandl.2013.05.011

22. Farquharson S. et al. White matter fiber tractography: why we need to move beyond DTI. *J Neurosurg*, 2013. Vol. 118, no. 6, pp. 1367–1377. DOI:10.3171/2013.2.JNS121294

23. Fedorenko E. et al. Broca's Area Is Not a Natural Kind. *Trends Cogn Sci.* 2020. Vol. 24, no. 4, pp. 270–284. DOI:10.1016/j.tics.2020.01.001

24. Fischl B. et al. Whole Brain Segmentation. *Neuron*, 2002. Vol. 33, no. 3, pp. 341–355. DOI:10.1016/s0896-6273(02)00569-x

25. Huang Y. et al. The Stroop effect: An activation likelihood estimation meta-analysis in healthy young adults. *Neurosci Lett*, 2020. Vol. 716, p. 134683. DOI:10.1016/j.neulet.2019.134683

26. Ivanova M.V. et al. Diffusion-tensor imaging of major white matter tracts and their role in language processing in aphasia. *Cortex.* 2016. Vol. 85, pp. 165–181. DOI:10.1016/j.cortex.2016.04.019

27. Korneev A.A. et al. Elaboration of Neuropsychological Evaluation of Children: Structural Analysis of Test Results. *Psychology in Russia: State of the Art*, 2021. Vol. 14, no. 4, pp. 18–37. DOI:10.11621/pir.2021.0402

28. Li X. et al. White-Matter Integrity and Working Memory: Links to Aging and Dopamine-Related Genes. *eNeuro*, 2022. Vol. 9, no. 2. DOI:10.1523/ENEURO.0413-21.2022

29. Lungu O. et al. Editorial: Neuropsychology Through the MRI Looking Glass. *Front Neurol*, 2020. Vol. 11, p. 609897. DOI:10.3389/fneur.2020.609897

30. Martin A. et al. Reading in the brain of children and adults: a meta-analysis of 40 functional magnetic resonance imaging studies. *Hum Brain Mapp.* 2015. Vol. 36, no. 5, pp. 1963–1981. DOI:10.1002/hbm.22749

31. Naeser M.A. et al. Transcranial magnetic stimulation and aphasia rehabilitation. *Arch Phys Med Rehabil.* 2012. Vol. 93, no. 1, suppl., pp. S26–34. DOI:10.1016/j.apmr.2011.04.026

32. Panikratova Y.R. et al. Functional connectivity of the dorsolateral prefrontal cortex contributes to different components of executive functions. *Int J Psychophysiol.* 2020. Vol. 151, pp. 70–79. DOI:10.1016/j.ijpsycho.2020.02.013

33. Shashidhara S. et al. Individual-subject Functional Localization Increases Univariate Activation but Not

are associated with different constructs of executive function // *Brain Struct Funct.* 2015. Vol. 220. № 3. P. 1291–1306. DOI:10.1007/s00429-014-0723-y

35. Stockert A. et al. Dynamics of language reorganization after left temporo-parietal and frontal stroke // *Brain.* 2020. Vol. 143. № 3. P. 844–861. DOI:10.1093/brain/awaa023

36. Whitwell J.L. Voxel-based morphometry: an automated technique for assessing structural changes in the brain // *J Neurosci.* 2009. Vol. 29. № 31. P. 9661–9664. DOI:10.1523/JNEUROSCI.2160-09.2009

37. Wu Q. et al. Cortical and subcortical responsiveness to intensive adaptive working memory training: An MRI surface-based analysis // *Hum Brain Mapp.* 2021. Vol. 42. № 9. P. 2907–2920. DOI:10.1002/hbm.25412

38. Yeo B.T. et al. The organization of the human cerebral cortex estimated by intrinsic functional connectivity // *J Neurophysiol.* 2011. Vol. 106. № 3. P. 1125–1165. DOI:10.1152/jn.00338.2011

Multivariate Pattern Discriminability in the “Multiple-demand” Frontoparietal Network. *J Cogn Neurosci.* 2020. Vol. 32, no. 7, pp. 1348–1368. DOI:10.1162/jocn_a_01554

34. Smolker H.R. et al. Individual differences in regional prefrontal gray matter morphometry and fractional anisotropy are associated with different constructs of executive function. *Brain Struct Funct.* 2015. Vol. 220, no. 3, pp. 1291–1306. DOI:10.1007/s00429-014-0723-y

35. Stockert A. et al. Dynamics of language reorganization after left temporo-parietal and frontal stroke. *Brain.* 2020. Vol. 143, no. 3, pp. 844–861. DOI:10.1093/brain/awaa023

36. Whitwell J.L. Voxel-based morphometry: an automated technique for assessing structural changes in the brain. *J Neurosci.* 2009. Vol. 29, no. 31, pp. 9661–9664. DOI:10.1523/JNEUROSCI.2160-09.2009

37. Wu Q. et al. Cortical and subcortical responsiveness to intensive adaptive working memory training: An MRI surface-based analysis. *Hum Brain Mapp.* 2021. Vol. 42, no. 9, pp. 2907–2920. DOI:10.1002/hbm.25412

38. Yeo B.T. et al. The organization of the human cerebral cortex estimated by intrinsic functional connectivity. *J Neurophysiol.* 2011. Vol. 106, no. 3, pp. 1125–1165. DOI:10.1152/jn.00338.2011

Информация об авторах

Паникратова Яна Романовна, кандидат психологических наук, научный сотрудник лаборатории нейровизуализации и мультимодального анализа, Научный центр психического здоровья (ФГБНУ НЦПЗ), г. Москва, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5698-4251>, e-mail: panikratova@mail.ru

Власова Роза Михайловна, кандидат психологических наук, доцент-исследователь Департамента психиатрии Университета Северной Каролины, г. Чапел-Хилл, США, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6455-8949>, e-mail: rosavlas@gmail.com

Лебедева Ирина Сергеевна, доктор биологических наук, зав. лабораторией нейровизуализации и мультимодального анализа, Научный центр психического здоровья (ФГБНУ НЦПЗ), г. Москва, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0649-6663>, e-mail: irina.lebedeva@ncpz.ru

Синицын Валентин Евгеньевич, доктор медицинских наук, профессор, зав. отделом лучевой диагностики Медицинского научно-образовательного центра, Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова (ФГБОУ ВО «МГУ имени М.В.Ломоносова»), г. Москва, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5649-2193>, e-mail: vsini@mail.ru

Печенкова Екатерина Васильевна, кандидат психологических наук, ведущий научный сотрудник Научно-учебной лаборатории когнитивных исследований, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (ФГАОУ ВО «НИУ ВШЭ»), г. Москва, Российская Федерация; ведущий научный сотрудник Медицинского научно-образовательного центра, Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова (ФГБОУ ВО «МГУ имени М.В.Ломоносова»), г. Москва, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3409-3703>, e-mail: evp@virtualcoglab.org

Information about the authors

Yana R. Panikratova, PhD in Psychology, Research Scientist at the Laboratory of Neuroimaging and Multimodal Analysis, Mental Health Research Center, Moscow, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5698-4251>, e-mail: panikratova@mail.ru

Roza M. Vlasova, PhD in Psychology, Research Assistant Professor at the Department of Psychiatry, University of North Carolina, Chapel Hill, the USA, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6455-8949>, e-mail: rosavlas@gmail.com

Irina S. Lebedeva, Doctor of Sciences in Biology, Head of the Laboratory of Neuroimaging and Multimodal Analysis, Mental Health Research Center, Moscow, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0649-6663>, e-mail: irina.lebedeva@ncpz.ru

Valentin E. Sinitsyn, Doctor of Sciences in Medicine, Head of the Radiology Department, Medical Research and Education Center of Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5649-2193>, e-mail: vsini@mail.ru

Ekaterina V. Pechenkova, PhD in Psychology, Leading Research Fellow at the Laboratory for Cognitive Research, HSE University, Moscow, Russia; Leading Research Fellow at Medical Research and Education Center of Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3409-3703>, e-mail: evp@virtualcoglab.org

Получена 01.08.2022

Принята в печать 25.08.2022

Received 01.08.2022

Accepted 25.08.2022