

На правах рукописи
УДК: 159.91:159.95

Адамович Тимофей Валерьевич

**Топологические особенности функциональных сетей мозга как
фактор индивидуальных различий в когнитивных способностях**

Специальность: 5.12.1 Междисциплинарные исследования когнитивных
процессов (психологические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата психологических наук

Санкт-Петербург
2026

Работа выполнена на кафедре общей и социальной психологии Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена»

Научный руководитель: **Малых Сергей Борисович**

Академик РАО, доктор психологических наук, профессор, заведующий лабораторией психогенетики Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный центр психологических и междисциплинарных исследований»

Официальные оппоненты: **Мачинская Регина Ильинична**

доктор биологических наук, профессор, член-корреспондент РАО, заведующий лабораторией нейрофизиологии когнитивного развития Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Институт развития, здоровья и адаптации ребенка»

Измалкова Анна Игоревна

кандидат психологических наук, научный сотрудник Центра исследований интеллекта и когнитивного благополучия Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

Защита состоится «17» сентября 2026 года в 15:30 на заседании Совета по защите диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук 33.2.018.15, созданного на базе Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена, по адресу: 191186, г. Санкт-Петербург, наб. р. Мойки, 48, корп. 11, ауд. 64.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена (191186, г. Санкт-Петербург, наб. р. Мойки, 48, корп. 5) и на сайте университета по адресу: https://disser.herzen.spb.ru/Preview/Karta/karta_000001277.html

Автореферат разослан «___» июля 2026 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета

Безгодова
Светлана Александровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Актуальность исследования обусловлена необходимостью углублённого понимания нейрофизиологических механизмов, лежащих в основе индивидуальных различий в когнитивных способностях. Под когнитивными способностями в настоящей работе понимаются устойчивые психические свойства, обеспечивающие выполнение задач, связанных с переработкой информации, — в первую очередь интеллект, рабочая память и тормозной контроль. Под индивидуальными различиями понимаются устойчивые межиндивидуальные вариации этих способностей, проявляющиеся в продуктивности выполнения соответствующих задач. Когнитивные способности вносят существенный вклад в успешность адаптации человека к требованиям среды, обучения и профессиональной деятельности, а устойчивые различия в их уровне и структуре остаются одной из центральных проблем дифференциальной психологии. При этом вопрос о том, какие именно характеристики мозговой организации формируют такие различия, при значительном объёме накопленных данных по-прежнему остаётся открытым.

Сетевой подход описывает мозг как систему взаимодействующих регионов, в которой когнитивные процессы реализуются распределённо. Функциональная связность характеризует статистическую взаимозависимость активности разных регионов, оцениваемую по нейрофизиологическим сигналам. Топология функциональной сети — это набор её структурных характеристик, описываемых аппаратом теории графов, такими как длина пути, кластеризация, модулярность, центральность узлов и др. Идея системного описания психических функций восходит к отечественной (П. К. Анохин, А. Р. Лурия) и зарубежной (D. Hebb, K. Lashley, J. McClelland) традициям; современные коннектомные и сетевые модели продолжают эту линию, формализуя её средствами теории графов. При таком подходе когнитивные способности рассматриваются как свойства организации распределённой переработки информации.

Несмотря на активное развитие сетевых моделей, ряд принципиальных вопросов в этой области остаётся нерешённым. Во-первых, неясно, какие параметры функциональной сетевой организации, отражающие распределённую координацию и селективность обработки информации, описываемую через соотношение интеграции и сегрегации, связаны с общим компонентом когнитивной эффективности, а какие — со спецификой отдельных когнитивных

процессов. Во-вторых, недостаточно работ, где невербальный интеллект, рабочая память и когнитивный тормозной контроль рассматриваются в рамках единой нейрофизиологической схемы. В-третьих, роль динамических характеристик сети — в том числе её способности к реконфигурации при переходе от покоя к выполнению задачи — изучена недостаточно.

Принципиальный методологический вопрос — зависимость результатов сетевого анализа от способа построения функциональных графов. Большинство исследований ориентировано на наиболее сильные взаимодействия, тогда как сравнительно слабые связи, несмотря на их возможный вклад в межмодульную интеграцию и гибкость сети, систематически исключаются из анализа. Выбор порога существенно влияет на конечную структуру графа и на интерпретацию результатов; это требует методических решений, учитывающих зависимость результатов от способа построения графа.

Таким образом, актуальность настоящего исследования определяется необходимостью системного анализа функциональной сетевой организации мозга как основы индивидуальных различий в когнитивных способностях, который позволит перейти от описания локальных нейронных коррелятов к анализу принципов организации когнитивной системы в целом и тем самым уточнить механизмы, лежащие в основе индивидуальных различий в интеллекте, рабочей памяти и когнитивном тормозном контроле.

Степень научной разработанности проблемы. Тема индивидуальных различий в когнитивных способностях и их психофизиологических оснований имеет длительную исследовательскую традицию. В отечественной дифференциальной психологии и психофизиологии данное направление получило развитие в работах Б.М. Теплова, В.Д. Небылицына, В.С. Мерлина, Б.Г. Ананьева, Э.А. Голубевой, С.Б. Малых и др., где индивидуальные различия рассматривались как проявление устойчивых свойств нервной системы и системной организации психической деятельности. В зарубежной науке исследование индивидуальных различий оформилось в рамках психометрической традиции в работах С. Spearman, L. Thurstone, H. Eysenck, P. Vernon и др. Существенный вклад внесли исследователи структуры интеллекта J. Carroll, R. Cattell, J. Horn, моделей рабочей памяти A. Baddeley, R. Engle, M. Kane, A. Conway, N. Unsworth, A.-L. Schubert, а также исполнительного контроля и его двойных механизмов A. Miyake, T. Braver, K. Kovacs, P. Ackerman. В области сетевой нейронауки и нейрофизиологии когнитивных способностей соответствующие результаты представлены в работах A. Barbey, K. Bansal, D.

Bassett, O. Sporns, M. Cole, A. Engel, P. Fries, K. Hilger, F. Krienen, J. Kruschwitz, S. Sadaghiani, E. Santarnecchi, K. Sreenivasan, J. Thiele и др.

Вместе с тем имеющиеся исследования преимущественно сосредоточены либо на отдельных когнитивных функциях, либо на частных сетевых показателях. При этом, совместный анализ невербального интеллекта, рабочей памяти и когнитивного тормозного контроля в рамках единой нейрофизиологической схемы представлен в единичных работах. Недостаточно разработан и вопрос о том, какие топологические характеристики функциональной связности отражают общий компонент когнитивной эффективности, а какие специфичны для отдельных способностей. Отдельного внимания требуют также два методологических аспекта — вклад сравнительно слабых связей в организацию сети и влияние выбора порога на получаемые результаты, — каждый из которых пока изучен слабо. Указанные пробелы и определяют постановку цели настоящего исследования.

Цель исследования — определить топологические особенности функциональных сетей мозга, ассоциированные с индивидуальными различиями в когнитивных способностях.

Объект исследования — индивидуальные различия в когнитивных способностях.

Предмет исследования — параметры организации функциональных сетей мозга, ассоциированные с индивидуальными различиями в когнитивных способностях.

Гипотезы исследования:

1. Топологическая структура сетей функциональной связности мозга ассоциирована с уровнем когнитивных способностей, включающих невербальный интеллект, рабочую память и когнитивный тормозной контроль.
2. Топология функциональных сетей, связанная с разными когнитивными способностями, имеет специфические для каждой способности компоненты.
3. Индивидуальные различия в когнитивных способностях обусловлены не только сильными связями внутри сетей, но и сравнительно слабыми связями.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Проанализировать текущие представления о сетевых основах когнитивных способностей и их индивидуальных различий.
2. Разработать методологию, позволяющую выделить топологические особенности индивидуальных сетей.
3. Определить топологические особенности сетей, ассоциированные с индивидуальными различиями в когнитивных способностях.

4. Определить топологические особенности сетей, уникальные для отдельных когнитивных задач.
5. Определить эффект сравнительно слабых связей в сетях на индивидуальные различия в когнитивных способностях.

Теоретико-методологическую основу исследования составили ключевые положения системной психофизиологии (П.К. Анохин, В.Б. Швырков, Ю.И. Александров и др.), когнитивной психологии (J. Carroll, R. Cattell, J. Horn и др.), когнитивной нейронауки (O. Sporns, A. Barbey и др.), дифференциальной психологии и психофизиологии (Б.М. Теплов, В.Д. Небылицын, Э.А. Голубева, С.Б. Малых, J.-G. Gustafson и др.).

Эмпирическая база исследования. В исследовании приняли участие 195 человек, преимущественно студенты вузов. Возраст участников составил от 17 до 39 лет ($M = 20,3$; $SD = 3,35$; 37 % — женщины). По данным самоотчёта (предварительного анкетирования) участники не имели психиатрических, неврологических заболеваний и черепно-мозговых травм в анамнезе.

Методы исследования. Регистрация нейрофизиологической активности мозга осуществлялась методом электроэнцефалографии (ЭЭГ) с использованием 64 электродов. Оценка невербального интеллекта проводилась с использованием стандартных прогрессивных матриц Дж.Равена; рабочая память оценивалась с помощью задачи Стернберга; когнитивный тормозной контроль — в задаче Фланкера. Функциональная организация мозговых сетей анализировалась на основе оценки межканальной фазовой и амплитудной синхронизации ЭЭГ-сигналов, интерпретируемой как показатель функциональной связности. На основе матриц связности конструировались взвешенные сети, для которых рассчитывались топологические характеристики в рамках теории графов. Статистическая обработка данных включала корреляционный анализ, линейные регрессионные модели, а также линейные смешанные модели со случайными эффектами.

Научная новизна. В настоящем исследовании впервые проведён критический анализ методологических подходов к функциональной связности в ЭЭГ, определены топологические корреляты невербального интеллекта, рабочей памяти и когнитивного тормозного контроля, а также показана значимость сравнительно слабых связей сети.

Теоретическая значимость. Расширены представления о топологии функциональных сетей как нейрофизиологическом базисе когнитивных способностей, показана их дифференцированная организация в зависимости от типа когнитивной деятельности. Подходы, разработанные в рамках

нейросетевой теории интеллекта, применены к анализу других когнитивных способностей — рабочей памяти и когнитивного тормозного контроля, — что позволило описать специфические топологические особенности функциональных сетей, связанные с организацией переработки информации в каждой из этих систем. Обоснована функциональная значимость сравнительно слабых связей как потенциального механизма межмодульной интеграции и гибкой реконфигурации когнитивной системы; до настоящего времени эта компонента сетевой архитектуры в рамках сетевого анализа оставалась недостаточно изученной.

Практическая значимость. В исследовании предложен методический подход, основанный на одновременном анализе множественных графов функциональной связности, построенных при различных значениях порога. Такой подход повышает устойчивость и воспроизводимость результатов, снижает зависимость выводов от произвольного выбора порогового значения и обеспечивает более корректную интерпретацию сетевых метрик. Разработан и апробирован метод анализа топологии функциональных сетей, учитывающий индивидуальные различия в когнитивных способностях и специфику ЭЭГ как источника данных. Систематизирован и апробирован комплекс методических решений, повышающих качество анализа функциональной связности: учёт слабых взаимодействий, оценка сетей на множестве пороговых значений, сопоставление разных способов построения графов. Предложенные методы могут быть адаптированы для данных других нейровизуализационных методов (в частности, фМРТ и МЭГ) и применены при сравнении различных групп испытуемых — в том числе в исследованиях индивидуальных различий и клинических выборок.

Достоверность и обоснованность результатов исследования обеспечиваются методологической обоснованностью работы, выбором методических средств, адекватных цели и объекту исследования, характеристиками выборки, применением релевантных методов сбора и анализа данных, а также использованием современного программного обеспечения.

Положения, выносимые на защиту:

1. Индивидуальные различия в невербальном интеллекте ассоциированы преимущественно с особенностями глобальной организации функциональных сетей мозга.
2. Когнитивные способности (рабочая память и когнитивный тормозной контроль) отражают сочетание общих и специфических механизмов обработки

информации, проявляющихся в частично перекрывающихся и дифференцированных параметрах функциональной сетевой организации мозга.

3. Необходимым условием корректной интерпретации связи между когнитивными показателями и параметрами сетевой организации мозга является учёт слабых взаимодействий и особенностей пороговой репрезентации функциональных сетей.

Апробация результатов исследования. Результаты исследования были представлены на заседаниях Лаборатории возрастной психогенетики Психологического института РАО (2019–2026), кафедры психофизиологии факультета психологии Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова (2019–2024), на конференциях «8th Annual Meeting of The Mathematical Cognition and Learning Society (MCLS2025)» (Гонконг, 2025), «Cognitive Neuroscience» (Екатеринбург, 2022–2024), «IEEE Ural-Siberian Conference on Computational Technologies in Cognitive Science, Genomics and Biomedicine (CSGB)» (Новосибирск, 2023), «VII Съезде Российского психологического общества» (Екатеринбург, 2022), «Научной конференции молодых учёных в области наук об образовании» (Москва, 2022), «Обработка и интеграция информации в сенсорных системах: от внешнего сигнала к сложному образу» (Москва, 2022), «Network Neuroscience» (online, 2021), «32nd International Congress of Psychology» (Прага, 2021), «Neuromatch» (online, 2020–2021), «IX Международной конференции по когнитивной науке» (Москва, 2020), «Big Data & AI Conference» (online, 2020), «Когнитивная наука в Москве — 2020: новые исследования» (Москва, 2020).

Публикации исследования. По теме диссертационного исследования опубликовано 7 работ, из них 6 — в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации, в том числе 5 — в журналах, индексируемых в Web of Science и Scopus. Общий объём опубликованных работ составил 9,45 печатных листа, авторский вклад — 6 печатных листов.

Структура и объём диссертации. Работа состоит из введения, трёх глав, выводов и заключения, списка литературы и приложений. Диссертация содержит 20 таблиц и 12 рисунков. Список литературы включает 424 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе «Психофизиологические подходы к изучению когнитивных процессов» представлен обзор теоретических подходов к

изучению когнитивных способностей в рамках сетевой нейронауки. Глава включает четыре раздела, последовательно раскрывающих понятие когнитивных способностей как предмета сетевого нейрофизиологического анализа, структуру изучаемых когнитивных процессов, сетевой подход к организации мозговой активности и функциональную связность как его эмпирическую реализацию.

Когнитивная деятельность определяется в работе как распределённая переработка информации. Центральное различие в работе проводится между когнитивными функциями и когнитивными способностями: под когнитивными функциями понимаются относительно специфические процессы переработки информации, обеспечивающие её удержание, селекцию, преобразование и подавление (Kiely, 2014); когнитивные способности отражают устойчивые индивидуальные различия в эффективности этих процессов, проявляющиеся в успешности выполнения когнитивных задач (Dilchert, 2018). Психометрические данные фиксируют существование индивидуальных различий, но не объясняют их механизмы, а локализационистская традиция оказывается недостаточной: сложные когнитивные процессы реализуются как согласованная работа множества элементов мозга. Концептуальные предпосылки для преодоления этого противоречия были заложены в системной традиции — отечественной (П. К. Анохин, А. Р. Лурия и др.) и зарубежной (D. Hebb, K. Lashley, J. McClelland), — однако необходимый для этого аппарат складывается лишь в современной сетевой нейронауке и её коннектомных моделях (Bassett, Sporns, 2017; Bullmore, Sporns, 2009).

Переработка информации в мозге реализуется через нейронные осцилляции (Buzsáki, Draguhn, 2004; Sadaghiani, Kleinschmidt, 2016), частотно-специфическая координация которых задаёт временную структуру межрегиональных взаимодействий. Функциональная архитектура мозга описывается аппаратом теории графов: узлы соответствуют анатомическим областям или электродам ЭЭГ, рёбра — функциональным взаимодействиям между ними (Deco et al., 2009; Sporns, Betzel, 2016). Сетевая организация мозга характеризуется свойствами «малого мира» (small-world) — высокой локальной кластеризацией при коротких средних путях, наличием модульной структуры и плотно связанного интегративного ядра — «богатого клуба» (Watts, Strogatz, 1998; van den Heuvel, Sporns, 2011). Топологические метрики — длина пути, кластеризация, модулярность, центральность по посредничеству и по собственному вектору, коэффициент богатого клуба, индекс малого мира —

дают количественные характеристики этих свойств. Эмпирические данные указывают на связь интеллекта с метриками глобальной интеграции преимущественно в альфа-диапазоне в состоянии покоя (Langer et al., 2011; Zakharov et al., 2020); сетевые корреляты рабочей памяти и тормозного контроля менее изучены, и единого описания их специфических и общих оснований пока нет.

Когнитивные способности имеют иерархическую организацию: общий фактор *g*, широкие способности (флюидный интеллект *Gf*, кристаллизованный *Gc*, рабочая память и др.) и специфические узкие способности (Spearman, 1904; Carroll, 1993; теория СНС — Schneider, McGrew, 2018). В качестве предмета настоящего исследования выбраны три способности, представляющие разные уровни этой иерархии: невербальный (флюидный) интеллект, рабочая память и когнитивный тормозной контроль. Рабочая память описывается через многокомпонентную модель Баддели — Хитча и её современные развития (Oberauer, 2002; Ericsson, Kintsch, 1995): ключевой механизм — удержание и преобразование информации в активном состоянии при ограниченной ёмкости. Когнитивный тормозной контроль рассматривается в рамках теорий исполнительного внимания (Engle, Kane, 2004) и теории двойных механизмов когнитивного контроля (Braver et al., 2008): ключевой механизм — подавление нерелевантной информации и поддержание целей. Эмпирически подтверждено, что рабочая память коррелирует с *g*-фактором на уровне 0,6–0,9 (Ackerman, Beier, Boyle, 2005; Kane, Hambrick, Conway, 2005; Gignac, 2014), а рабочая память и тормозной контроль разделяют общий ресурс исполнительного внимания (Hasher et al., 2007; Conway, Kane, Engle, 2003). Эти три способности образуют сочетание общих и специфических компонентов, что позволяет различить, какие сетевые параметры связаны с общим когнитивным ядром, а какие — со спецификой отдельных процессов.

На стыке сетевой нейронауки и психологии когнитивных способностей выработан ряд теоретических моделей. Теория фронто-париетальной интеграции (P-FIT; Jung, Haier, 2007) описывает интеллект как переработку информации в распределённой системе лобных и теменных областей. Система множественных требований (multiple-demand system; Duncan, 2010) трактуется как универсальная фронто-париетальная архитектура управления требованиями задачи. Теория перекрытия процессов (Kovacs, Conway, 2019) объясняет общий фактор интеллекта (*g*) частичным наложением базовых когнитивных процессов — внимания, рабочей памяти и контроля. Нейросетевая теория интеллекта (Barbey,

2018) связывает индивидуальные различия в когнитивных способностях с топологией нейронных сетей и их способностью к адаптивной реконфигурации. Общий для этих моделей принцип — баланс интеграции и сегрегации: ни глобальная интеграция, ни локальная специализация по отдельности не обеспечивают максимальной когнитивной эффективности. Эти модели задают теоретический контекст настоящей работы и обозначают вопрос о том, какие именно топологические параметры функциональных сетей соотносятся с индивидуальными различиями в исследуемых способностях.

Сопоставление психометрической структуры когнитивных способностей с топологией функциональных сетей мозга обнаруживает несколько нерешённых вопросов. Психометрическая структура предполагает сочетание общности и дифференциации, тогда как ряд нейросетевых моделей описывает когнитивную успешность через относительно единый топологический профиль; соответствие между этими картинками пока недостаточно прояснено. Динамический аспект сетевой организации — реконфигурация сети при переходе от состояния покоя к выполнению задачи — также требует систематического анализа: определяет ли когнитивную эффективность устойчивая архитектура сети или её способность к перестройке. Методологические решения существенно влияют на интерпретацию: значения топологических метрик зависят от способа построения функциональной сети (выбор меры связности, процедура определения порога), сравнение сетей разной плотности может давать артефактные различия (Garrison et al., 2015; van Wijk, Stam, Daffertshofer, 2010), а сложившаяся практика анализа графов на основе только сильных связей потенциально ограничивает понимание механизмов глобальной интеграции и динамической перестройки сети. Специфика ЭЭГ — высокая временная разрешающая способность при ограниченных возможностях пространственной локализации — задаёт собственный набор аналитических задач, отличных от фМРТ-исследований. Из изложенного вытекает постановка проблемы настоящей работы: системно сопоставить психометрическую структуру когнитивных способностей с топологическими характеристиками функциональных сетей мозга как в состоянии покоя, так и в условиях когнитивной нагрузки, с учётом вклада сравнительно слабых связей и зависимости результатов от методических решений, в первую очередь от выбора порога.

Во второй главе «Методы исследования» описаны выборка, экспериментальные процедуры и аналитический аппарат настоящего исследования. В исследовании приняли участие 195 студентов (возраст 17–39

лет; $M = 20,3$; $SD = 3,35$; 37 % — женщины), без зарегистрированных психиатрических или неврологических заболеваний.

Невербальный интеллект оценивался в онлайн-формате перед записью ЭЭГ с помощью сокращённого варианта прогрессивных матриц Равена (наборы C, D, E, F). В ходе записи ЭЭГ участники последовательно выполняли две задачи: распознавание предметов по парадигме Стернберга (Sternberg Item Recognition Paradigm, SIRP) — для оценки рабочей памяти, и задачу Фланкера — для оценки когнитивного тормозного контроля. Каждая сессия начиналась с регистрации состояния покоя длительностью 10 минут с чередующимися двухминутными блоками с открытыми и закрытыми глазами; в дальнейшем анализе использовались только блоки с открытыми глазами.

ЭЭГ регистрировалась с использованием 64 электродов по системе 10–10 и усилителя Brain Products ActiChamp в экранированной комнате. Импеданс электродов снижался подготовкой кожи и нанесением проводящего геля и поддерживался ниже 20 кОм. Предобработка данных включала смену референта на REST (Yao, 2001), фильтрацию выше 1 Гц и очистку с помощью ICA с автоматической классификацией компонент (ICLabel; Pion-Tonachini et al., 2019). В среднем 36 ± 9 % компонент были удалены как артефактные. Данные сегментировались на интервалы длительностью 1 с для покоя и 800 мс для задач, с дополнительной очисткой алгоритмом autoreject (Jas et al., 2017). Анализ проводился отдельно для тета- (4–8 Гц), альфа- (8–13 Гц), низкого бета- (13–20 Гц) и высокого бета- (20–30 Гц) диапазонов.

Функциональная связность оценивалась с применением пяти мер межканальной синхронизации: взвешенного индекса фазового запаздывания (wPLI), мнимой части когерентности (imcoh), когерентности, скорректированной мнимой фазовой согласованности (ciPLV) и парной фазовой согласованности (PPC). Для оценки эффектов в задачах Стернберга и Фланкера дополнительно применялась оценка взаимной информации с использованием Гауссовой копулы (Ince et al., 2017), усреднявшаяся по пяти временным интервалам внутри задачи. Полученные матрицы связности использовались как матрицы смежности взвешенных графов, в которых рассчитывались следующие топологические метрики: средняя и характеристическая длины пути, коэффициент кластеризации, коэффициент участия, модулярность, центральность по посредничеству, центральность по собственному вектору, коэффициент богатого клуба (rich-club coefficient) и индекс малого мира (small-world index, SWI). Модули определялись алгоритмом Лейдена (Traag et al., 2019).

При построении сетей в основных анализах использовались два значения порога — 0,5 и 0,8. Для проверки чувствительности результатов к выбору порога дополнительный анализ проводился в диапазоне порогов от 0,1 до 0,9 с шагом 0,1, а для оценки межгрупповых различий — в диапазоне 0,01–0,99 с шагом 0,01.

Для оценки связи метрик топологии с невербальным интеллектом применялся бутстрапный коэффициент корреляции Спирмена; эффект считался значимым при $p < 0,05$ одновременно в тестовой (60 % выборки) и валидационной (40 % выборки) подвыборках. Для оценки связи топологии с точностью и временем ответа в задачах Стернберга и Фланкера применялся бутстрап коэффициентов линейной регрессии со смешанными эффектами (2000 итераций); идентификатор испытуемого вводился как случайный эффект. Значимость определялась через 90 %-й двусторонний бутстрап-доверительный интервал, не пересекающий нуль.

Предобработка ЭЭГ и оценка функциональной связности проводились в MNE-Python (Gramfort et al., 2014); связность через взаимную информацию — в пакете Frites (Combrisson et al., 2022); расчёт топологических метрик — в пакете NetworkX (Hagberg et al., 2008); статистический анализ — в R с использованием пакета lme4 (Bates et al., 2015).

Третья глава «Результаты исследования и их обсуждение» содержит четыре раздела, последовательно отвечающих на четыре вопроса: насколько чувствительны выводы сетевого анализа к выбору порога; какие топологические характеристики связаны с невербальным интеллектом; чем различаются и в чём сходятся сетевые корреляты рабочей памяти и когнитивного тормозного контроля; какую роль в этих ассоциациях играют сравнительно слабые связи.

3.1. Проблема выбора порогового значения при анализе функциональной связности мозга. Построение функциональной сети из ЭЭГ предполагает выбор порогового значения для перехода от полной матрицы связности к разрежённому графу. Единых рекомендаций по выбору порога не сложилось; от этого выбора потенциально зависят все последующие выводы. Целью данного раздела являлась систематическая оценка влияния порога на параметры сетей и на результаты потенциального исследования.

Для пяти мер межканальной синхронизации (wPLI, imcoh , ciPLV , когерентность, PPC) глобальные метрики функциональной связности (длина пути, коэффициент кластеризации, коэффициент участия, SWI) демонстрируют выраженный линейный тренд изменения при возрастании порога с 0,1 до 0,9. Значения коэффициента детерминации линейных моделей варьируются в

диапазоне 0,10–0,97 при медиане $R^2 = 0,62$; то есть основная доля изменения метрик при изменении порога линейно связана с плотностью сети. Разные меры синхронизации при этом дают существенно различающиеся топологические профили на одних и тех же данных.

Анализ структуры корреляций между значениями метрик при разных порогах показал, что коэффициенты корреляции быстро снижаются с увеличением расстояния между порогами: топология сети, полученной даже при близких пороговых значениях, может существенно различаться. Наиболее чувствительной к выбору порога метрикой оказался коэффициент участия. Сравнение пропорционального определения порога с подходом, основанным на данных (orthogonal minimum spanning tree, OMST), дало расходящиеся результаты для соответствующих уровней плотности — то есть выбор методического подхода напрямую влияет на конечные значения метрик.

Оценка устойчивости межгрупповых выводов проводилась через систематический пермутационный t-тест межполовых различий в каждой метрике при пороге от 0,01 до 0,99 с шагом 0,01. Исходно ожидалось, что отсечение сравнительно слабых связей даст непрерывные сегменты значимых различий, появляющиеся преимущественно при высоких порогах. На практике результаты группового сравнения непосредственно зависят от уровня порога: для коэффициента участия различия незначимы при большинстве порогов, но значимые «окна» возникают на разных уровнях диапазона; для других метрик «значимые интервалы» нередко начинаются заметно ниже наиболее употребительных значений (~0,8). Характерный пример — SWI для PPC в сенсорном пространстве: при низких порогах значения SWI у мужчин выше, чем у женщин (положительный d Коэна), при высоких — наоборот. То есть выбор порога способен изменить направление эффекта на противоположное.

Из полученных результатов следует, что глобальные метрики графа варьируются в зависимости от уровня плотности сети и демонстрируют при её изменении выраженный линейный тренд. Пропорциональное определение порога приводит к существенным искажениям структуры графа при переходе между соседними значениями. Наиболее чувствительной к процедуре определения порога метрикой оказывается коэффициент участия. Алгоритмы, работающие непосредственно с данными (без фиксированного порога), способны давать результаты, существенно расходящиеся с теми, что получены традиционной процедурой. Выбор порога может менять сам итог группового анализа — вплоть до того, будет ли эффект зарегистрирован как значимый, и в

каком направлении. Помимо порога, топология сетей зависит и от выбора меры функциональной связности. Пять мер, рассмотренных в работе (wPLI, imcoh, ciPLV, когерентность, PPC), дают существенно различающиеся топологические профили на одних и тех же данных. Поэтому в основных эмпирических разделах использовались две меры фазовой синхронизации (wPLI и imcoh) одновременно, и эффект считался значимым только при его воспроизведении в обеих мерах; это снижает чувствительность результатов к артефактам выбора меры.

Полученные результаты задают методическую основу для последующих содержательных разделов: при анализе связей топологии с когнитивными показателями необходим контроль чувствительности результатов к выбору порога — это и реализуется в разделе 3.2 (анализ при широком диапазоне порогов) и в разделе 3.4 (специальный анализ роли слабых связей).

3.2. Топологические особенности функциональной связности мозга, ассоциированные с индивидуальными различиями в невербальном интеллекте. В этом разделе оценивалась связь между метриками топологии функциональной связности в состоянии покоя и невербальным интеллектом. Согласно нейросетевой теории интеллекта (Barbey, 2018), общий интеллект определяется не свойствами отдельных структур мозга, а топологией функциональной сети и её способностью к интеграции распределённой информации. Гипотеза нейронной эффективности (Haier et al., 1988) предполагает, что более высокий интеллект ассоциирован с более экономной работой мозга. Из этих представлений следует ожидание связи интеллекта с метриками глобальной интеграции функциональной сети.

На первом этапе бутстрап-корреляция Спирмена между метриками топологии (порог 0,5) и невербальным интеллектом рассчитывалась в тестовой и валидационной подвыборках. Значимыми считались только метрики, ассоциированные с интеллектом одновременно в двух мерах синхронизации (wPLI и imcoh) и в обеих подвыборках. Такие корреляции обнаружены для метрик длины пути в альфа-диапазоне (Таблица 1).

Таблица 1. Коэффициенты бутстрапной корреляции метрик топологии сетей функциональной связности в состоянии покоя с невербальным интеллектом в альфа-диапазоне (сенсорное пространство).

Метрики топологии	wPLI (тест.)	wPLI (валид.)	imcoh (тест.)	imcoh (валид.)
Характ. длина пути	0,41*	0,31*	0,30*	0,32*
Средняя длина пути	0,43*	0,36*	0,30*	0,17
Коэф. кластеризации	-0,06	0,01	0,07	-0,28*
SWI	0,38*	0,27*	0,24	0,22
Модулярность	-0,07	-0,20	-0,04	-0,09

Центр. по собств. вектору	–0,06	0,16	–0,04	0,02
------------------------------	-------	------	-------	------

Примечание. SWI — индекс малого мира; звёздочкой отмечены значимые коэффициенты корреляции ($p < 0,05$). Адаптировано из (Zakharov et al., 2020).

Линейная регрессия с учётом пола, возраста и спектральной мощности альфа-диапазона как ковариат подтвердила, что характеристическая длина пути остаётся значимым предиктором невербального интеллекта при обеих мерах связности ($R^2 = 0,168$ для $wPLI$; сопоставимый результат для $imcoh$).

На следующем этапе длины путей были рассчитаны на разных порогах (0,1–0,9 с шагом 0,1). Значимые корреляции с невербальным интеллектом наблюдались для метрик длины пути на порогах от 0,1 до 0,6 (с коэффициентами от 0,24 до 0,36; FDR-корректированное $p < 0,05$); при пороге 0,7 и выше — то есть при включении только наиболее сильных связей — значимые корреляции отсутствовали. Это указывает на то, что вклад в связь между сетевой топологией и интеллектом вносят не только сильные, но и слабые связи в сети.

Из проведённого анализа следует, что в состоянии покоя невербальный интеллект устойчиво ассоциирован с интегративными характеристиками функциональной сети, прежде всего с метриками длины пути в альфа-диапазоне. Наиболее воспроизводимые ассоциации обнаружены в сенсорном пространстве ЭЭГ и подтверждаются как в тестовой, так и в валидационной подвыборках. Информация о связи сети с интеллектом содержится не только в сильных, но и в сравнительно слабых связях, и их исключение может приводить к потере значимого эффекта. В целом более высокий невербальный интеллект ассоциирован с более интегрированной и распределённой организацией функциональной сети, бóльшая длина пути в которой соответствует более распределённой и избыточной коммуникации между регионами и потому требует бóльших метаболических затрат.

Далее рассмотрены топологические особенности рабочей памяти и когнитивного тормозного контроля.

3.3. Топологические особенности функциональной связности мозга, ассоциированные с индивидуальными различиями в рабочей памяти и когнитивном тормозном контроле. Рабочая память и когнитивный тормозной контроль — две относительно независимые когнитивные способности, опирающиеся, по существующим представлениям, на разные нейронные механизмы. Их сравнительный анализ позволяет различить общие и специфические сетевые корреляты когнитивной деятельности.

Связь точности выполнения задач Стернберга и Фланкера с топологией функциональной связности оценивалась через бутстрап коэффициентов линейной регрессии со смешанными эффектами; идентификатор испытуемого использовался как случайный эффект. Результаты по точности приведены в Таблице 2.

Таблица 2. Регрессионные коэффициенты предикторов точности в задачах Фланкера и Стернберга

Метрики топологии	Тета (4–8 Гц)		Альфа (8–13 Гц)		Бета-низк. (13–20 Гц)		Бета-выс. (20–30 Гц)	
	Задача	Покой	Задача	Покой	Задача	Покой	Задача	Покой
Фланкер								
Средняя длина пути	0,02	0,11	0,06	0,02	-0,04	0,01	0,02	0,05
Коэф. кластеризации	-0,19	-0,06	-0,10	-0,02	-0,04	-0,19	-0,04	-0,14
Коэф. участия	0,06	0,05	0,06	-0,13	-0,16	-0,23	-0,11	-0,13
Модулярность	0,12	-0,04	0,02	-0,10	-0,05	-0,06	-0,04	-0,07
Центр. по посредничеству	0,05	-0,02	-0,01	-0,10	-0,02	0,01	-0,02	-0,02
Центр. по собств. вектору	-0,05	0,02	0,02	-0,10	0,08	-0,13	0,03	-0,08
Коэф. богатого клуба	0,05	0,02	0,10	-0,05	0,07	-0,07	0,05	-0,07
Стернберг								
Средняя длина пути	0,04 / -0,10	0,08	0,19* / -0,01	-0,04	0,08 / 0,10	-0,06	0,03 / 0,14*	-0,00
Коэф. кластеризации	-0,10 / -0,08	0,00	-0,00 / -0,10	0,16	0,00 / -0,06	0,11	-0,02 / -0,14*	0,06
Коэф. участия	0,07 / -0,19*	-0,03	0,19* / -0,01	0,02	0,18* / 0,03	0,07	0,16 / 0,15	0,03
Модулярность	0,10 / 0,05	-0,18	-0,00 / 0,10	-0,03	0,06 / -0,00	0,11	0,12* / 0,15*	-0,04
Центр. по посредничеству	0,02 / -0,03	-0,08	-0,06 / -0,01	-0,05	0,03 / -0,03	-0,01	0,04 / 0,07	-0,02
Центр. по собств. вектору	0,00 / 0,07	-0,09	-0,11* / 0,03	0,04	-0,00 / -0,02	0,07	0,01 / -0,01	0,03
Коэф. богатого клуба	0,07 / 0,06	-0,12	-0,03 / 0,03	0,01	0,09 / -0,03	0,11	0,10* / 0,02	-0,02

Примечание. В каждой ячейке указан средний регрессионный коэффициент бутстрап-распределения. Для задачи Стернберга в столбце «Задача» приведены коэффициенты для двух фаз через дробь: верхняя строка — фаза запоминания (Запом.), нижняя — фаза извлечения (Извл.). Значимые коэффициенты отмечены звёздочкой; направление эффекта определяется знаком коэффициента. Данные адаптированы из (Adamovich et al., 2024).

Точность в задаче Стернберга связана с динамикой сетей в альфа- и высоком бета-диапазонах. В высоком бета-диапазоне рост точности связан с повышением кластеризации и модулярности на фазе запоминания и со снижением коэффициента богатого клуба на фазе извлечения.

Точность в задаче Фланкера, напротив, связана с низкочастотными диапазонами — тета и альфа. Высокая локальная связность в этих диапазонах снижает точность в задаче на тормозной контроль (отрицательные коэффициенты для кластеризации в тета и альфа); центральность по собственному вектору в низком бета-диапазоне положительно коррелирует с точностью; модулярность в тета-диапазоне ассоциирована с более высокой точностью.

Анализ связи топологии сети с временем ответа в обеих задачах представлен в Таблице 3.

Таблица 3. Регрессионные коэффициенты предикторов времени ответа в задачах Фланкера и Стернберга

Метрики топологии	Тета (4–8 Гц)		Альфа (8–13 Гц)		Бета-низк. (13–20 Гц)		Бета-выс. (20–30 Гц)	
	Задача	Покой	Задача	Покой	Задача	Покой	Задача	Покой
Фланкер								
Средняя длина пути	0,10	0,09	-0,06	0,03	-0,20	0,03	-0,12	0,00
Кэф. кластеризации	-0,05	-0,01	-0,18	0,13	-0,01	-0,16	0,02	-0,06
Кэф. участия	0,13	-0,06	-0,07	-0,14	-0,27	-0,11	-0,17	-0,09
Модулярность	0,01	-0,10	0,06	-0,21	-0,06	0,01	-0,10	0,02
Центр. по посредничеству	0,09	-0,02	0,13	-0,12	-0,12	0,07	-0,06	0,06
Центр. по собств. вектору	-0,05	-0,09	-0,04	-0,10	0,08	-0,06	0,08	-0,00
Кэф. богатого клуба	-0,03	-0,05	-0,01	-0,12	0,06	-0,03	0,01	0,04
Стернберг								
Средняя длина пути	-0,14 / -0,03	-0,05	-0,02 / -0,17*	0,00	0,03 / -0,07	-0,03	-0,05 / 0,01	0,10
Кэф. кластеризации	-0,12 / -0,05	-0,05	0,12* / -0,02	-0,24	0,03 / 0,10	-0,10	-0,01 / 0,07	-0,09
Кэф. участия	-0,23* / 0,04	-0,13	0,05 / -0,10	-0,06	0,01 / -0,05	-0,09	-0,08 / 0,05	0,10
Модулярность	-0,13 / -0,11*	-0,15	-0,15* / -0,07	-0,03	-0,16* / -0,19*	-0,09	-0,11 / -0,11	-0,06
Центр. по посредничеству	-0,01 / 0,00	-0,04	-0,08 / -0,07	0,04	-0,10 / -0,18*	-0,02	-0,13* / -0,11*	0,00
Центр. по собств. вектору	0,01 / -0,07	-0,01	0,02 / -0,07	-0,08	0,05 / 0,05	-0,06	0,04 / 0,00	-0,08
Кэф. богатого клуба	-0,09 / -0,12	-0,12	-0,00 / -0,04	-0,13	-0,02 / -0,04	-0,17	0,01 / -0,09	-0,12

Примечание. Обозначения соответствуют Примечаниям Таблицы 2. Данные адаптированы из (Adamovich et al., 2024).

Сравнительный анализ показывает, что топологические корреляты точности и времени ответа расходятся в обеих задачах. В задаче Стернберга

часть метрик (модулярность, центральность по собственному вектору) ассоциирована с обоими показателями в одном направлении; это согласуется с предположением о частичном перекрытии нейронных механизмов хранения и извлечения информации. В задаче Фланкера, напротив, корреляты точности и времени ответа во многом независимы, что согласуется с известным феноменом компромисса «скорость — точность».

Эти ассоциации содержательно интерпретируются следующим образом. Отрицательная связь кластеризации с точностью в задаче Фланкера говорит о том, что чрезмерно высокая локальная связность затрудняет фильтрацию нерелевантных стимулов: плотно сцеплённые группы регионов продолжают обрабатывать отвлекающие признаки, и тормозный контроль ослабевает. Положительная связь модулярности с точностью в задаче Стернберга означает, что чёткое разделение сети на модули поддерживает удержание информации в рабочей памяти: содержание каждого модуля защищено от интерференции со стороны соседних, что повышает устойчивость следа памяти. Снижение коэффициента богатого клуба на фазе извлечения в Стернберге укладывается в ту же картину: для быстрого доступа к содержимому памяти выгодно временно ослабить плотно связанное ядро хабов и дать модулям обмениваться информацией напрямую.

Сопоставление состояния покоя и условий задачи показало, что задача Стернберга связана с активной перестройкой сети при переходе от покоя к выполнению, тогда как задача Фланкера в большей степени опирается на свойства базовой сетевой архитектуры. Поставленный в первой главе вопрос — определяется ли когнитивная эффективность устойчивой архитектурой сети или её способностью к реконфигурации — имеет в работе задачно-специфический ответ: устойчивость базовой архитектуры и гибкость реконфигурации проявляются по-разному в разных когнитивных способностях. Несмотря на специфичность паттернов, связанных с задачами, обнаружены и общие компоненты — модулярность в тета-диапазоне, кластеризация в альфа-диапазоне и коэффициент богатого клуба в альфа-диапазоне ассоциированы с тремя из четырёх когнитивных показателей. Это указывает на существование «ядра» функциональных процессов когнитивной деятельности (Krienen, Yeo, Buckner, 2014; Mill, Ito, Cole, 2017; Sadaghiani, Wirsich, 2020).

Результаты согласуются с теорией перекрытия процессов (Kovacs, Conway, 2016), постулирующей наличие частичного наложения общих для разных

доменов исполнительных процессов в основе общего фактора когнитивных способностей при сохранении специфики отдельных способностей.

Из полученных данных следует, что топологические характеристики функциональных сетей, связанные с рабочей памятью и когнитивным тормозным контролем, существенно зависят от когнитивного состояния: значимые метрики во время выполнения задач отличаются от значимых метрик в состоянии покоя. Для задачи Стернберга более существенны показатели глобальной интеграции и баланса интеграции и сегрегации, тогда как для задачи Фланкера сильнее выражена роль локальной организации, кластеризации и центральности сети. Паттерны ассоциаций для точности и времени ответа различаются в обеих задачах, что указывает на частичную независимость нейрофизиологических механизмов успешности и скорости выполнения. Рабочая память в большей степени ассоциирована со способностью сети к быстрой реконфигурации, тогда как когнитивный тормозной контроль сильнее опирается на свойства базовой архитектуры. Наряду со специфичностью задач выявлены и частично общие топологические компоненты, что указывает на наличие общего организационного ядра когнитивной деятельности.

Далее проведён аналогичный анализ с включением сравнительно слабых связей.

3.4. Роль слабых функциональных связей в индивидуальных различиях когнитивных способностей. В этом разделе анализируется связь топологии функциональной сети с точностью выполнения задач Стернберга и Фланкера при систематическом включении сравнительно слабых связей в анализ. Под включением сравнительно слабых связей понимается анализ сетей, построенных при низких значениях порога (от 0,1 до 0,6 с шагом 0,1), при которых в граф попадают не только сильные, но и сравнительно слабые функциональные взаимодействия. Результаты приведены в Таблице 4.

В первой главе выделены две функции сравнительно слабых связей — межмодульная интеграция и поддержка гибкой реконфигурации сети. Первую функцию полученные данные подтверждают прямо: при включении сравнительно слабых связей появляются дополнительные ассоциации с метриками глобальной организации (длина пути, коэффициент участия, коэффициент богатого клуба). Вторую — лишь косвенно: наибольший дополнительный эффект от включения сравнительно слабых связей наблюдается в задаче Стернберга, где сеть активно перестраивается при переходе от покоя к выполнению.

Таблица 4. Точность в задачах Фланкера и Стернберга со включением сравнительно слабых связей

Метрики топологии	Тета (4–8 Гц)		Альфа (8–13 Гц)		Бета-низк. (13–20 Гц)		Бета-выс. (20–30 Гц)	
	Задача	Покой	Задача	Покой	Задача	Покой	Задача	Покой
Фланкер								
Средняя длина пути	0,08	0,09	0,08	0,10	0,06	0,09	0,05	0,00
Козф. кластеризации	-0,15	-0,04	-0,17	0,04	0,02	0,04	-0,03	0,02
Козф. участия	0,12	-0,06	0,03	0,07	0,03	0,04	-0,04	-0,10
Модулярность	-0,08	0,14	0,02	-0,01	-0,05	-0,04	0,00	0,03
Центр. по посредничеству	0,03	0,03	0,03	-0,06	0,00	-0,02	0,00	-0,01
Центр. по собств. вектору	-0,07	-0,00	0,01	0,05	-0,04	-0,03	0,01	0,01
Козф. богатого клуба	-0,00	0,05	0,10	0,06	0,06	0,01	0,11	0,05
Стернберг								
Средняя длина пути	-0,03 / 0,02	-0,00	-0,02 / 0,01	-0,05	0,12 / 0,14	-0,16	0,12 / 0,04	-0,05
Козф. кластеризации	-0,27* / -0,05	0,01	-0,13* / -0,10	0,02	-0,17* / -0,02	0,09	-0,13* / -0,07	0,15
Козф. участия	-0,23* / -0,07	0,06	-0,15 / -0,06	-0,02	-0,01 / 0,20	-0,12	0,09 / -0,07	0,05
Модулярность	0,20* / 0,07	-0,05	0,12 / 0,02	0,03	0,11* / -0,16*	-0,02	0,04 / -0,01	-0,10
Центр. по посредничеству	-0,00 / -0,02	0,02	-0,03 / 0,03	-0,02	0,06 / -0,00	-0,02	0,03 / 0,07	0,02
Центр. по собств. вектору	-0,01 / -0,08	-0,02	0,06 / -0,02	0,09	-0,01 / -0,03	-0,03	-0,07 / 0,01	0,02
Козф. богатого клуба	0,17* / 0,01	0,01	0,12* / -0,03	0,06	0,12* / -0,06	-0,01	0,07 / 0,03	-0,07

Примечание. Обозначения соответствуют аналогичным Таблицы 2. Данные адаптированы из (Adamovich et al., 2024).

Включение сравнительно слабых связей в анализ выявляет дополнительные ассоциации с поведенческими показателями для всех метрик во всех частотных диапазонах. Для рабочей памяти повышенная точность связана со снижением коэффициента кластеризации во всех частотных диапазонах на фазе запоминания, повышенной модулярностью и коэффициентом богатого клуба в тета-диапазоне, снижением коэффициента участия в этом же диапазоне. Для когнитивного тормозного контроля повышенная точность связана со снижением коэффициента кластеризации в тета- и альфа-диапазонах и положительными ассоциациями с коэффициентом богатого клуба в альфа- и высоком бета-диапазонах.

Эти ассоциации согласуются с принципом «силы слабых связей» Грановеттера: множество сравнительно слабых рёбер связывает между собой кластеры сети, препятствует изоляции модулей и обеспечивает распространение информации по всей сети (Granovetter, 1973; Pajevic, Plenz, 2012). На теоретическом уровне это означает компромисс между коммуникационной эффективностью и энергетическими затратами: для поддержания высокой интеграции сеть может нести избыточное множество связей разной силы, что повышает её устойчивость к локальным сбоям (Bullmore, Sporns, 2012; Liu et al., 2022). Более энергозатратная сеть может оказываться более эффективной для когнитивной деятельности, поскольку её организация ориентирована не на минимизацию метаболических затрат, а на интеграцию распределённой информации; сравнительно слабые связи становятся ключевым компонентом такой конфигурации.

Из полученных данных следует, что включение сравнительно слабых связей в анализ выявляет дополнительные ассоциации между топологией сети и когнитивными показателями, которые не обнаруживаются при работе только с сильными рёбрами. В задаче Стернберга сравнительно слабые связи существенны для интеграции информации, процессов запоминания и извлечения, а также для реконфигурации сети при переходе от покоя к выполнению задачи. В задаче Фланкера сравнительно слабые связи сопряжены с распределённой межрегиональной коммуникацией и гибким перераспределением ресурсов, обеспечивающими тормозной контроль и скорость обработки. Сравнительно слабые связи представляют собой функционально значимую часть сетевой организации, обеспечивающую межмодульную интеграцию и гибкость системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Полученные результаты позволяют рассматривать индивидуальные различия в когнитивных способностях как различия в организации распределённой переработки информации. Интеллект, рабочая память и когнитивный тормозной контроль предстают не как полностью автономные способности, а как частично перекрывающиеся варианты функционирования единой когнитивной системы. Эта система, по литературным данным, включает общий организационный компонент, который связывают с поддержанием целей и регуляцией текущей деятельности (Miyake et al., 2000; Braver, 2012), а также

более частные механизмы, связанные со спецификой селекции, удержания и преобразования информации.

Связь невербального интеллекта с глобальными характеристиками функциональной сети — в первую очередь с показателями длины пути в альфа-диапазоне — согласуется с нейросетевой теорией интеллекта, по которой общий интеллект определяется не свойствами одной анатомической структуры, а особенностями топологии сети и её способностью интегрировать распределённые источники информации (Barbey, 2018). Когнитивная эффективность в сетевой перспективе означает не минимизацию локальных затрат, а оптимальную организацию распределённой системы, способной к гибкой перестройке. Локальная экономичность нейронных ресурсов и сетевая избыточность взаимодополняют друг друга и характеризуют разные аспекты работы когнитивной системы.

Сопоставление рабочей памяти и когнитивного тормозного контроля выявило сочетание общих и специфических компонентов. Одни и те же сетевые характеристики могут быть значимыми для нескольких когнитивных показателей (общее ядро), тогда как другие специфичны для отдельных задач (функционально-специфическая периферия). Такая картина наиболее последовательно интерпретируется в рамках теории перекрытия процессов (Kovacs, Conway, 2019): общий фактор когнитивных способностей опирается на частичное наложение общих для разных доменов исполнительных процессов, а специфика отдельных способностей задаётся конфигурацией периферийных процессов и их подключением к ядру. Точность и время ответа в обеих задачах опираются на частично различные сетевые механизмы — это означает, что когнитивная способность представляет собой систему частично перекрывающихся процессов.

Учёт сравнительно слабых связей и пороговой зависимости сетевых эффектов показал, что когнитивно значимая организация сети не исчерпывается наиболее сильными и устойчивыми взаимодействиями. Сравнительно слабые связи здесь — функционально значимый компонент сетевой архитектуры, возможный механизм межмодульной интеграции, обеспечивающий гибкость и устойчивость когнитивной системы. В сетевой перспективе оптимальной с когнитивной точки зрения оказывается не архитектура, минимизирующая метаболические затраты, а архитектура, использующая сравнительно слабые связи для поддержки межмодульной интеграции, — даже ценой большей энергетической стоимости такой конфигурации (Bullmore, Sporns, 2012). Это согласуется с принципом

«силы слабых связей» (Granovetter, 1973; Pajevic, Plenz, 2012) и с современными моделями структурно-функциональной организации коннектома (Civier et al., 2019; Garrison et al., 2015).

Три исследованные способности занимают разные уровни в иерархии когнитивных способностей (Carroll, 1993; McGrew, 2023): невербальный интеллект — широкая способность, наиболее близкая к общему фактору; рабочая память — широкая способность среднего уровня; когнитивный тормозной контроль — более узкая способность в составе исполнительного домена. Сетевые корреляты этих способностей соответствуют их положению в иерархии. Невербальный интеллект связан с глобальными характеристиками сети — длиной пути в альфа-диапазоне в состоянии покоя; рабочая память и тормозной контроль — с более локальными параметрами (кластеризация, модулярность, центральность), преимущественно во время задачи. Чем выше способность в иерархии, тем более глобальной и общей для разных доменов оказывается соответствующая ей топологическая характеристика. Таким образом, индивидуальные различия в когнитивных способностях разных уровней иерархии отражаются в соответствующих по уровню топологических характеристиках функциональных сетей мозга.

На основании результатов исследования можно сделать следующие выводы:

1. Процедура определения порога напрямую влияет на значения топологических метрик функциональных сетей, однако устоявшихся методических рекомендаций для выбора порога не существует — это затрудняет сравнение результатов разных исследований и препятствует накоплению воспроизводимого знания в области.
2. Даже близкие значения порога дают различающиеся топологические структуры — вплоть до противоположных выводов о наличии или направлении экспериментального эффекта.
3. Необходим пересмотр методических подходов: анализ на нескольких порогах одновременно, учёт индивидуальных различий, оценка множества аналитических сценариев и валидация на независимых выборках.
4. Топологические характеристики функциональной связности мозга существенно зависят от текущего когнитивного состояния и отражают его специализированную сетевую организацию.
5. Невербальный интеллект тесно ассоциирован с длиной пути в альфа-диапазоне в состоянии покоя.

6. Рабочая память (задача Стернберга) ассоциирована с длиной пути, модулярностью, коэффициентом участия и центральностью в тета-, альфа- и бета-диапазонах в ходе выполнения задачи, а также с коэффициентом кластеризации, центральностью и коэффициентом богатого клуба в тета-, альфа- и высоком бета-диапазонах в состоянии покоя. Когнитивный тормозной контроль (задача Фланкера) ассоциирован преимущественно с коэффициентом кластеризации и центральностью в тета-, альфа- и бета-диапазонах — как в задаче, так и в покое.

7. Изменения топологии между покоем и выполнением задачи различаются по типу задачи. Для рабочей памяти это изменения коэффициента кластеризации в тета-, альфа- и бета-диапазонах, а также центральности, модулярности и коэффициента участия в тета-диапазоне. Для когнитивного тормозного контроля — изменения длины пути и центральности в альфа-, бета- и тета-диапазонах, а также коэффициента богатого клуба в альфа- и нижнем бета-диапазонах. Это согласуется с тем, что рабочая память требует быстрой перестройки сети, тогда как тормозной контроль сильнее опирается на её базовую архитектуру.

8. Паттерны ассоциаций с точностью и со временем ответа в двух задачах также расходятся — это указывает на различия в нейрофизиологической основе успешности и скорости когнитивных процессов.

9. При всех различиях между паттернами ассоциаций топологических метрик с когнитивными показателями их частичное пересечение указывает на существование ядра функциональных процессов когнитивной деятельности.

10. Ассоциации с когнитивными показателями обнаруживаются не только при учёте сильных связей, но и при включении в анализ сравнительно слабых. Такие ассоциации зафиксированы для всех метрик топологии во всех исследованных частотных диапазонах; сравнительно слабые связи, по-видимому, способствуют межрегиональной интеграции информации и фильтрации шума.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации:

1. Адамович, Т. В. Интеграция и сегрегация в функциональных сетях головного мозга / Т. В. Адамович // Теоретическая и экспериментальная психология. — 2020. — Т. 13. — № 3. — С. 86–110. (1,6 п. л.)
2. Adamovich, T. Alpha band resting-state EEG connectivity is associated with non-verbal intelligence / I. Zakharov, T. Adamovich, A. Tabueva, Y. Kovas, S. Malykh // *Frontiers in Human Neuroscience*. — 2020. — Vol. 14. — Art. 10. — DOI: 10.3389/fnhum.2020.00010. (Scopus) (1,23 п. л. / 0,5 п. л.)
3. Adamovich, T. Assessing the relationship between verbal and nonverbal cognitive abilities using resting-state EEG functional connectivity / I. Feklicheva, I. Zakharov, N. Chipeeva, E. Maslennikova, S. Korobova, T. Adamovich, V. Ismatullina, S. Malykh // *Brain Sciences*. — 2021. — Vol. 11. — No. 1. — Art. 94. — DOI: 10.3390/brainsci11010094. (Scopus) (1,4 п. л. / 0,3 п. л.)
4. Adamovich, T. The thresholding problem and variability in the EEG graph network parameters / T. Adamovich, I. Zakharov, A. Tabueva, S. Malykh // *Scientific Reports*. — 2022. — Vol. 12. — Art. 18659. — DOI: 10.1038/s41598-022-22079-2. (Scopus) (1,37 п. л. / 1 п. л.)
5. Adamovich, T. Task-specific topology of brain networks supporting working memory and inhibition / T. Adamovich, V. Ismatullina, N. Chipeeva, I. Zakharov, I. Feklicheva, S. Malykh // *Human Brain Mapping*. — 2024. — Vol. 45. — N. 13. — Art. e70024. — DOI: 10.1002/hbm.70024. (Scopus) (2,64 п. л. / 2 п. л.)
6. Adamovich, T. Higher integration of the whole-brain resting state theta band network is associated with spatial working memory / A. Pavlova, T. Adamovich, S. Malykh // *Frontiers in Human Neuroscience*. — 2026. — Vol. 20. — Art. 1748183. — DOI: 10.3389/fnhum.2026.1748183. (Scopus) (0,75 п. л. / 0,4 п. л.)

Статьи в других изданиях:

7. Adamovich, T. The effect of density thresholding on the EEG network construction / I. Zakharov, T. Adamovich, A. Tabueva, V. Ismatullina, S. Malykh // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2021. — Vol. 1727, № 1: Big Data and AI Conference 2020 (Moscow, 17–18 September 2020). — Art. 012009. — DOI: 10.1088/1742-6596/1727/1/012009. (0,46 п. л. / 0,2 п. л.)