

УДК 159.955:612.822

DOI:10.34670/AR.2026.33.92.016

## Нейрофизиологические корреляты когнитивной гибкости при умеренной когнитивной нагрузке: пилотное мультимодальное ЭЭГ-исследование

Литаш-Сорокина Елена Александровна

Аспирант,  
Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ,  
119571, Российская Федерация, Москва, просп. Вернадского, 84;  
Магистрант,  
Московский институт психоанализа,  
123007, Российская Федерация, Москва, Кутузовский просп., 34/14;  
e-mail: elena@lita.sh

### Аннотация

Настоящее пилотное мультимодальное исследование было направлено на изучение нейросетевых коррелятов когнитивной гибкости в условиях увеличения когнитивной и акустической нагрузки с использованием электроэнцефалографии. В итоговый анализ были включены данные 17 здоровых женщин (первоначально  $N = 18$ ; одна запись исключена на этапе предобработки ЭЭГ). Эксперимент имел внутригрупповой дизайн и включал состояние покоя, выполнение когнитивной задачи в условиях тишины и выполнение той же задачи при акустическом воздействии (70 дБ). Оценка когнитивной продуктивности проводилась с использованием батареи тестов Cognifit, субъективное функциональное состояние оценивалось по методике САН. Функциональная связность ЭЭГ анализировалась с применением фазовых (PLV, wPLI) и амплитудных (AEC) метрик в тета-, альфа- и бета-диапазонах для фронтальной, лобно-теменной, теменной и височно-теменной сетей. Статистически значимых групповых различий показателей функциональной связности между экспериментальными условиями выявлено не было. Вместе с тем на индивидуальном уровне обнаружены тенденции перестройки сетевых взаимодействий, преимущественно в тета- и альфа-диапазонах, ассоциированные с различиями в стратегиях выполнения задачи, отражающих баланс между скоростью и точностью. Полученные результаты указывают на выраженную межиндивидуальную вариативность нейрофизиологических механизмов когнитивной гибкости в условиях нагрузки и подчёркивают информативность индивидуально-ориентированного анализа функциональной связности ЭЭГ в пилотных исследованиях.

### Для цитирования в научных исследованиях

Литаш-Сорокина Е.А. Нейрофизиологические корреляты когнитивной гибкости при умеренной когнитивной нагрузке: пилотное мультимодальное ЭЭГ-исследование // Психология. Историко-критические обзоры и современные исследования. 2025. Т. 14. № 12А. С. 224-241. DOI:10.34670/AR.2026.33.92.016

**Ключевые слова**

Когнитивная гибкость, функциональная связность ЭЭГ, когнитивная нагрузка, акустическая нагрузка, исполнительные функции, альфа-ритм, тета-ритм, мультимодальное исследование, пилотное исследование, нейрофизиологические маркеры.

**Введение**

В условиях современной информационно насыщенной среды когнитивная деятельность человека всё чаще осуществляется при одновременном воздействии многоканальных сенсорных стимулов и повышенных требований к переработке информации. Современные нейрокогнитивные модели рассматривают адаптацию поведения в условиях нагрузки как результат динамического взаимодействия когнитивных и регуляторных механизмов, обеспечивающих гибкость реагирования на изменяющиеся требования среды. В этом контексте в рамках современных нейрокогнитивных моделей когнитивная гибкость определяется как способность адаптивно изменять стратегии мышления и поведения, эффективно переключаться между задачами и правилами и перераспределять когнитивные ресурсы (Hohl, Dolcos, 2024).

Рост когнитивной нагрузки в условиях цифровизации и многозадачности приводит к перераспределению внимания, увеличению нагрузки на рабочую память и снижению эффективности обработки информации. Постоянное воздействие отвлекающих факторов, включая акустическое загрязнение, влияет на устойчивость исполнительных функций и субъективное восприятие сложности задач, усиливая когнитивное утомление даже при сохранении поведенческой эффективности (Mark et al., 2018; Lee, 2024).

**Основная часть**

Когнитивная гибкость рассматривается как мультимодальный конструкт, связанный с взаимодействием исполнительных функций, рабочей памяти и динамической координацией распределённых функциональных сетей мозга, прежде всего фронто-теменной сети [Dajani, Uddin, 2015; Uddin, 2021; Cole et al., 2013; Cai et al., 2023]. Наиболее изучены нейронные механизмы переключения правил, распределения внимания и ингибирования интерференции, реализуемые за счёт согласованной активности лобных и теменных областей коры (Ionescu, 2012; Jung et al., 2018).

Несмотря на значительный объём эмпирических данных, остаётся открытым вопрос о том, в какой мере проявления когнитивной гибкости определяются локальной активностью отдельных областей мозга или отражают перестройку функциональных сетей в целом. Хотя фронто-теменная сеть рассматривается как ключевой субстрат исполнительного контроля, данные о чувствительности её функциональной связности к кратковременной когнитивной нагрузке остаются противоречивыми (Cole et al., 2013; Hohl et al., 2019).

Электроэнцефалография является чувствительным методом изучения динамики когнитивных процессов благодаря высокой временной разрешающей способности и возможности анализа спектральных характеристик и функциональной связности между корковыми областями (Cohen, 2014; Bastos, Schoffelen, 2016). Использование фазовых и амплитудных метрик (PLV, wPLI, AEC) позволяет исследовать сетевую организацию мозга, лежащую в основе когнитивной гибкости, однако роль межиндивидуальной вариативности и

чувствительность этих показателей к умеренной кратковременной нагрузке остаются недостаточно изученными (Vinck et al., 2011; Fries, 2015; Uddin, 2021).

Настоящее пилотное мультимодальное исследование направлено на изучение нейрофизиологических коррелятов когнитивной гибкости в условиях когнитивной нагрузки и акустического отвращения с использованием субъективных, поведенческих и ЭЭГ-показателей. Работа ориентирована на выявление как групповых закономерностей, так и индивидуальных профилей адаптации и направлена на уточнение границ чувствительности сетевых показателей ЭЭГ при анализе когнитивной гибкости в условиях умеренной нагрузки.

В рамках настоящего исследования когнитивная гибкость операционализируется как способность к адаптивному переключению когнитивных стратегий, перераспределению внимания и ингибированию интерференции в условиях изменяющихся требований задачи. Она рассматривается как интегративный поведенческий конструкт, отражаемый совокупностью показателей скорости, точности и эффективности выполнения задач переключения. На поведенческом уровне когнитивная гибкость оценивалась по показателям времени выполнения, точности и интегральной эффективности компьютерной батареи Cognifit, которые интерпретируются как прокси-метрики когнитивной гибкости, а не как клиническая диагностика (Dajani, Uddin, 2015; Uddin, 2021). На нейрофизиологическом уровне анализировались спектральные характеристики и метрики функциональной связности ЭЭГ (wPLI, PLV, AEC) в  $\theta$ -,  $\alpha_1$ -,  $\alpha_2$ - и  $\beta$ -диапазонах. Следует подчеркнуть, что показатели Cognifit в рамках данного исследования интерпретируются как поведенческие прокси-метрики когнитивной гибкости и не используются в диагностических или клинических целях.

Исследование проводилось на базе кафедры нейробиологии Московского института психоанализа. Все участники подписали информированное согласие на участие и обработку данных. Участники имели нормальное или скорректированное до нормального зрение и не сообщали о наличии неврологических, психических или хронических заболеваний.

В исследовании приняли участие 18 женщин в возрасте от 25 до 50 лет, рекрутированных добровольно через социальные сети. Один участник был исключён на этапе предобработки ЭЭГ-данных из-за неудовлетворительного качества записей; итоговый анализ проводился на выборке из 17 человек. В исследовании участвовали только женщины, что учитывалось при интерпретации результатов. Ограниченный и однородный состав выборки снижает обобщаемость результатов, однако внутригрупповой дизайн частично компенсирует малый объём выборки.

Критериями исключения являлись эпилепсия, черепно-мозговые травмы, приём психотропных или психостимулирующих препаратов, а также употребление алкоголя за 24 часа до эксперимента.

Использовался внутригрупповой дизайн (within-subjects), при котором каждый участник последовательно проходил все экспериментальные условия. Порядок условий был фиксирован: состояние покоя → когнитивная задача в тишине → когнитивная задача при шумовом воздействии (70 дБ). Такой порядок был выбран для анализа направленной динамики когнитивной нагрузки и не рандомизировался; возможный эффект порядка учитывался при интерпретации результатов.

Эксперимент (рис. 1) проводился в два этапа в течение одного дня (воскресенье, 12:00–19:00) в тихом помещении с комфортным освещением. Запись ЭЭГ включала:

- состояние покоя с открытыми глазами (17–29 с);
- выполнение когнитивной задачи в тишине (2,8–3,3 мин);

– выполнение той же задачи при шумовом воздействии (2,8–3,3 мин).

Между этапами предусматривались перерывы продолжительностью 3–5 минут, в ходе которых участники заполняли шкалу функционального состояния САН для оценки самочувствия, активности и настроения.

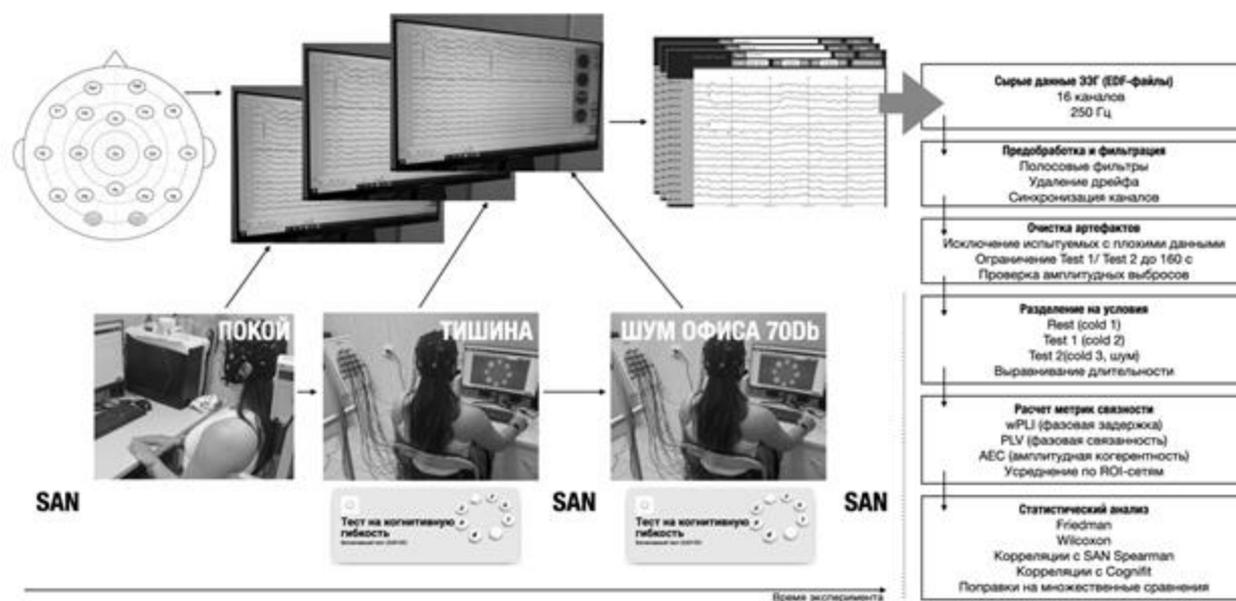


Рисунок 1 – Схема проведения эксперимента

Для оценки когнитивной гибкости использовалась стандартизированная компьютерная батарея Cognifit, включающая задания на переключение правил, ингибирование интерференции и одновременное выполнение нескольких условий.

Анализируются показатели времени выполнения, точности и интегральной эффективности (отношение точности ко времени). Cognifit рассматривался как инструмент оценки прокси-метрик когнитивной гибкости, а не как средство клинической диагностики. Экспорт данных осуществлялся вручную.

Шумовое воздействие представляло собой офисный open-space шум интенсивностью около 70 дБ, предъявляемый через динамик, расположенный на расстоянии 1,5 м от участника. Уровень шума контролировался с использованием бытового шумомера, что учитывалось как ограничение точности калибровки.

ЭЭГ регистрировалась с использованием 16-канальной системы Neurotravel (Ates Medica, Италия) по международной системе 10–20 с дополнительной регистрацией ЭОГ. Частота дискретизации составляла 500 Гц, импеданс поддерживался ниже 10 кΩ, использовался усреднённый референт; применялась аналоговая фильтрация 0,5–50 Гц. Предобработка данных выполнялась одинаково для всех участников и условий и включала полосовую фильтрацию (1–35/40 Гц), при необходимости notch-фильтр 50 Гц, ресемплинг до 250 Гц и ререференцию к усреднённому референту. Удаление артефактов глазной и мышечной активности проводилось методом независимого компонентного анализа (ICA) с использованием MNE-Python 3.10. Записи исключались из анализа при наличии более 20% каналов с выраженными артефактами

или невозможности корректного выделения EOG-компонент. После очистки данные представляли собой непрерывные временные ряды ЭЭГ для каждого участника и условия. Спектральная мощность вычислялась методом Уэлча в диапазонах  $\theta$ ,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  и  $\beta$ . Функциональная связность оценивалась с использованием фазовых (PLV, wPLI) и амплитудных (AEC) метрик в скользящих окнах с последующей агрегацией по функциональным сетям: лобной, теменной, лобно-теменной и височно-теменной.

Для статистического анализа использовались непараметрические методы: критерий Фридмана для связанных выборок и критерий Уилкоксона для попарных сравнений с поправкой Бонферрони. Дополнительно рассчитывался размер эффекта  $r$ . Уровень значимости принимался равным  $p < 0,05$  с учётом поправок.

Для оценки изменений субъективного состояния участников в ходе эксперимента был проведён анализ результатов теста САН, заполнявшегося в трёх временных точках: до начала эксперимента (baseline), после выполнения первой когнитивной задачи в тишине и после выполнения второй задачи под воздействием акустического шумового загрязнения. Анализ включал оценку трёх шкал («Самочувствие», «Активность», «Настроение») и интегрального показателя (среднее трёх шкал).

Описательная статистика ( $M \pm SEM$ ).

- Самочувствие: baseline  $5.74 \pm 0.29$ ; задача 1  $5.64 \pm 0.25$ ; задача 2  $5.45 \pm 0.25$ .
- Активность: baseline  $5.36 \pm 0.29$ ; задача 1  $5.06 \pm 0.33$ ; задача 2  $4.98 \pm 0.32$ .
- Настроение: baseline  $6.00 \pm 0.28$ ; задача 1  $5.78 \pm 0.30$ ; задача 2  $5.72 \pm 0.28$ .
- Интегральный показатель САН: baseline  $5.70 \pm 0.25$ ; задача 1  $5.49 \pm 0.25$ ; задача 2  $5.38 \pm 0.24$ .

По всем шкалам наблюдается сходная динамика: показатели снижаются после выполнения первой задачи и продолжают снижаться после выполнения задания под шумом.

Критерий Фридмана (глобальные различия).

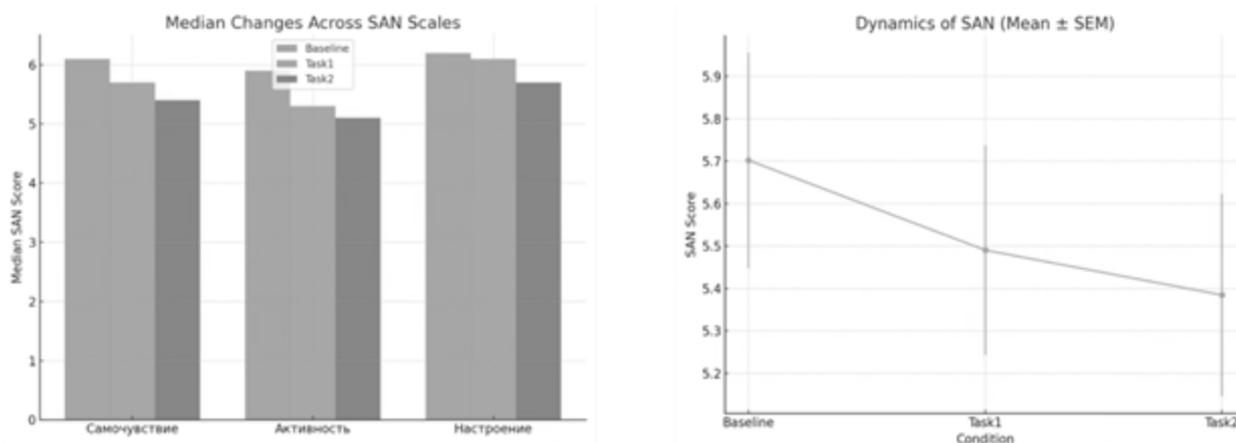
- Самочувствие:  $\chi^2(2) = 4.67$ ,  $p = 0.097$ .
- Активность:  $\chi^2(2) = 2.58$ ,  $p = 0.275$ .
- Настроение:  $\chi^2(2) = 1.09$ ,  $p = 0.580$ .
- Интегральный САН:  $\chi^2(2) = 3.85$ ,  $p = 0.146$ .

Статистически значимых глобальных различий не выявлено ( $p > 0.05$ ). После поправки на множественные сравнения ( $p < 0.017$ ) достоверных различий также не выявлено.

Парные сравнения (Wilcoxon) и размеры эффектов ( $r$ ).

- Самочувствие: baseline vs задача 1  $p = 0.531$ ,  $r = 0.16$ ; baseline vs задача 2  $p = 0.038 \rightarrow p_{\text{Бонф}} = 0.115$ ,  $r = 0.52$ ; задача 1 vs задача 2  $p = 0.133$ ,  $r = 0.38$ .
- Активность: baseline vs задача 1  $p = 0.234$ ,  $r = 0.30$ ; baseline vs задача 2  $p = 0.170$ ,  $r = 0.34$ ; задача 1 vs задача 2  $p = 0.437$ ,  $r = 0.19$ .
- Настроение: baseline vs задача 1  $p = 0.271$ ,  $r = 0.29$ ; baseline vs задача 2  $p = 0.142$ ,  $r = 0.41$ ; задача 1 vs задача 2  $p = 0.944$ ,  $r \approx 0.02$ .
- Интегральный САН: baseline vs задача 1  $p = 0.263$ ,  $r = 0.27$ ; baseline vs задача 2  $p = 0.117$ ,  $r = 0.39$ ; задача 1 vs задача 2  $p = 0.431$ ,  $r = 0.19$ .

Таким образом, различия между тремя временными точками статистически значимыми не являются. При этом по всем шкалам наблюдается направленное снижение средних значений от baseline к условию с шумом (рис.1); для шкалы «Самочувствие» при сравнении baseline и шумового условия отмечен крупный размер эффекта ( $r \approx 0.52$ ) при непрохождении поправки. В связи с этим изменения по САН в рамках настоящей выборки трактуются как тенденция.



**Рисунок 2 – Тенденция динамики субъективного самочувствия**

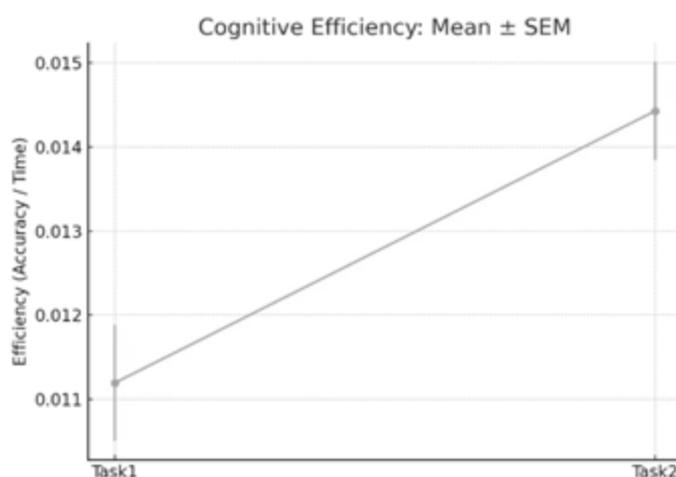
Для количественной оценки когнитивной гибкости был проведён анализ поведения участников при выполнении двух задач в рамках теста Cognifit: первой — в условиях тишины, и второй — под воздействием акустического шумового загрязнения (70 дБ). Проанализированы три показателя когнитивной продуктивности: время выполнения, точность и интегральная эффективность (отношение точности к времени выполнения).

Описательная статистика ( $M \pm SEM$ ).

- Время выполнения (секунды): Task 1 (тишина)  $80.78 \pm 3.99$ ; Task 2 (шум)  $67.07 \pm 2.51$ .
- Точность выполнения: Task 1  $0.6 \pm 0.014$ ; Task 2  $0.945 \pm 0.012$ .
- Интегральная эффективность (accuracy/time): Task 1  $0.01119 \pm 0.00069$ ; Task 2  $0.01443 \pm 0.00059$ .

Во всех трёх метриках наблюдается однонаправленная динамика: участники выполняют вторую задачу быстрее, точнее и эффективнее, чем первую (рис.2).

- Статистический анализ (Wilcoxon).
- Время выполнения:  $p = 0.0026$ ;  $Z = 3.01$ ;  $r = 0.73$ .
- Точность:  $p = 0.00063$ ;  $Z = -3.42$ ;  $r = 0.83$ .
- Интегральная эффективность:  $p = 0.00168$ ;  $Z = -3.14$ ;  $r = 0.76$ .



**Рисунок 3 – Динамика интегральной когнитивной продуктивности**

Таким образом, между Task 1 и Task 2 выявлены статистически значимые различия по времени выполнения, точности и интегральной эффективности ( $p < 0.01$ ) с большими размерами эффекта. Отмечено, что улучшение показателей может частично отражать эффект повторного выполнения задания, что учитывается при интерпретации результатов в разделе «Обсуждение».

Фазовые (PLV, wPLI) и амплитудные (AEC) метрики функциональной связности использовались для оценки различных аспектов межрегионального взаимодействия: фазовой синхронизации и ко-модуляции амплитудных огибающих соответственно. Применение wPLI в анализе эмоциональных состояний EEG подтверждается в современных работах (например, Bai et al., 2025). PLV используется для оценки фазовой синхронности и функциональной связности в контексте эмоциональной активности (Wang, Y., et al. 2024). Амплитудная корреляция огибающих (AEC) обсуждается в обзорах (Godfrey et al., 2021) как один из устойчивых способов оценки FC.

Динамика функциональной связности (wPLI). Метрика wPLI использовалась как показатель направленной фазовой асимметрии и применялась для оценки устойчивых функциональных взаимодействий между областями при сниженной чувствительности к объёмной проводимости (Shafiei et al., 2024).

Фронтальная сеть

–  $\theta$ : 0.1938  $\rightarrow$  0.1532  $\rightarrow$  0.1360;  $\alpha_1$ : 0.2138  $\rightarrow$  0.1526  $\rightarrow$  0.1462;  $\alpha_2$ : 0.2011  $\rightarrow$  0.1318  $\rightarrow$  0.1354;  
 $\beta$ : 0.0756  $\rightarrow$  0.0784  $\rightarrow$  0.0462.

– Статистика: все диапазоны  $\chi^2(2) < 3.0$ ,  $p > 0.08$ ; для парных сравнений все  $p_{\text{corr}} > 0.017$ .

Фронтальная сеть демонстрирует снижение  $\alpha_1$ – $\alpha_2$ -связанности, статистически значимые эффекты не выявлены.

Теменная сеть

–  $\theta$ : 0.1434  $\rightarrow$  0.1142  $\rightarrow$  0.0997;  $\alpha_1$ : 0.1919  $\rightarrow$  0.1028  $\rightarrow$  0.1087;  $\alpha_2$ : 0.2237  $\rightarrow$  0.1036  $\rightarrow$  0.0887;  
 $\beta$ : 0.0911  $\rightarrow$  0.0658  $\rightarrow$  0.0552.

Статистика: все диапазоны  $\chi^2(2) \leq 3.4$ ,  $p = 0.10$ – $0.17$ ; все  $p_{\text{corr}} > 0.017$ .

На уровне описательных данных отмечено наиболее выраженное снижение  $\alpha_2$ , без статистической достоверности.

3.3.3. Лобно-теменная сеть

–  $\theta$ : 0.1590  $\rightarrow$  0.1347  $\rightarrow$  0.1206;  $\alpha_1$ : 0.2123  $\rightarrow$  0.1473  $\rightarrow$  0.1491;  $\alpha_2$ : 0.2365  $\rightarrow$  0.1182  $\rightarrow$  0.1183;  
 $\beta$ : 0.0901  $\rightarrow$  0.0711  $\rightarrow$  0.0503.

Статистика: все диапазоны  $\chi^2(2) < 3.4$ ,  $p > 0.06$ ; все  $p_{\text{corr}} > 0.017$ .

Отмечен согласованный паттерн снижения  $\alpha_2$ , статистически значимые эффекты отсутствуют.

3.3.4. Височно-теменная сеть

–  $\theta$ : 0.1581  $\rightarrow$  0.1388  $\rightarrow$  0.1267;  $\alpha_1$ : 0.2099  $\rightarrow$  0.1464  $\rightarrow$  0.1754;  $\alpha_2$ : 0.2254  $\rightarrow$  0.1330  $\rightarrow$  0.1334;  
 $\beta$ : 0.0979  $\rightarrow$  0.0572  $\rightarrow$  0.0478.

Статистика:  $\chi^2(2) < 2.8$ ,  $p > 0.12$ ; все  $p_{\text{corr}} > 0.017$ .

Перестройка показателей носит описательный характер и не достигает статистической значимости.

Итог по wPLI. Во всех исследованных сетях отмечается согласованное снижение  $\alpha_2$ -связанности при переходе от покоя к задачным условиям, однако статистически значимых различий между состояниями покоя, выполнения задачи в тишине и выполнения задачи при шуме не выявлено ( $p > 0.05$ ).

Динамика фазовой синхронизации (PLV). Метрика PLV использовалась как показатель стабильности фазовой разности двух сигналов (Lachaux et al., 1999).

По данным сравнения условий (покой → тишина → шум) статистически значимых перестроек PLV ни в одной из сетей и частотных диапазонов не выявлено (все  $p > 0.15-0.32$  в зависимости от сети). Для фронтальной сети отмечалось лёгкое снижение PLV в  $\alpha_1-\alpha_2$  диапазонах; в частности, для  $\alpha_2$  приводились значения  $0.4721 \rightarrow 0.3950 \rightarrow 0.3882$ . Для теменной сети  $\alpha_2$  оставался практически неизменным ( $0.3249 \rightarrow 0.3207 \rightarrow 0.3156$ ). В целом PLV оставался наиболее стабильной метрикой.

Динамика когерентности амплитуд (AEC). AEC использовалась как мера согласованности медленных амплитудных колебаний (ко-модуляции активности) между областями; по данным ВКР, на уровне описательных трендов для AEC отмечается систематическое снижение  $\alpha_2$  при нагрузке, при отсутствии статистически значимых различий (все  $p > 0.05$ ).

В сетевом анализе для фронтальной, лобно-теменной, височно-теменной и теменной сетей описаны вариативные изменения AEC в  $\theta$ - и  $\beta$ -диапазонах, без формирования устойчивого общего паттерна. Статистический анализ не выявил значимых различий между условиями по метрике AEC ( $p > 0.05$ ). Выявленные изменения трактуются как описательные; интерпретация приведена в разделе «Обсуждение».

Индивидуальные взаимосвязи функциональной связности с субъективными и поведенческими показателями

В условиях отсутствия статистически значимых групповых различий по метрикам функциональной связности был выполнен анализ индивидуальных взаимосвязей между показателями ЭЭГ-коннективности, субъективного состояния и когнитивной продуктивности.

Показаны индивидуальные ассоциации между показателями функциональной связности лобно-теменной сети и субъективными оценками состояния по шкале САН. Более высокие значения AEC и wPLI в  $\alpha_1$ -диапазоне во время выполнения первой когнитивной задачи были связаны с более низкими показателями настроения после её завершения. В условиях выполнения задачи при шумовом воздействии отмечена ассоциация между  $\theta$ -фазовой связностью (wPLI) в лобно-теменной сети и показателями настроения после второго блока.

Анализ взаимосвязей между показателями функциональной связности и поведенческими характеристиками выполнения задачи показал, что более высокие значения фазовой синхронизации (PLV и wPLI) в  $\alpha_1$ -диапазоне лобно-теменной сети во время выполнения первой задачи ассоциировались с увеличением времени выполнения при тенденции к повышению точности. Указанный профиль соотносится с различиями в индивидуальных стратегиях выполнения задания и не приводит к изменению групповых средних показателей.

Таким образом, при отсутствии выраженных групповых эффектов показатели функциональной связности демонстрируют индивидуальные ассоциации с субъективными и поведенческими характеристиками выполнения когнитивной задачи. Выявленные взаимосвязи носят тенденциальный характер и требуют проверки на расширенных выборках и в протоколах с большей длительностью нагрузки.

## Обсуждение

Одним из ключевых результатов настоящего исследования стало отсутствие статистически значимых групповых различий между тремя экспериментальными состояниями — покоем, выполнением когнитивного задания в тишине и выполнением того же задания при шумовом

фоне — по всем использованным метрикам функциональной связности: wPLI, PLV и AEC (Приложения 3–5). Хотя на первый взгляд подобный результат может показаться «негативным», он имеет самостоятельную научную ценность. Отсутствие выраженных сетевых сдвигов описано в ряде современных исследований, особенно при кратковременных протоколах (Cole, 2024).

В условиях отсутствия статистически значимых групповых различий по метрикам функциональной связности (wPLI, PLV, AEC) анализ был сосредоточен на описательных трендах изменения связности между экспериментальными состояниями.

По данным wPLI во всех исследованных сетях наблюдается однонаправленное снижение связности в  $\alpha_2$ -диапазоне при переходе от покоя к выполнению когнитивной задачи в тишине; при переходе к шумовому фону общий тренд сохраняется. Наиболее выраженное снижение  $\alpha_2$ -связности отмечено в теменной и лобно-теменной сетях, однако различия не достигают статистической значимости ( $p > 0.05$ ).

В  $\alpha_1$ -диапазоне для теменной, лобно-теменной и височно-теменной сетей во втором блоке задания отмечается относительное повышение wPLI по сравнению с первым блоком, тогда как во фронтальной сети сопоставимая динамика не наблюдается.

Для  $\theta$ -диапазона характерна неоднородная динамика: в большинстве сетей при переходе к задачным условиям отмечается снижение wPLI, но в теменной и височно-теменной сетях во втором блоке наблюдается относительное повышение  $\theta$ -связанности по сравнению с первым блоком.

Метрика PLV демонстрирует высокую стабильность фазовой синхронизации: изменения по сетям и диапазонам остаются в пределах вариативности и не формируют направленных перестроек, что согласуется с отсутствием значимых эффектов по критерию Фридмана.

По данным AEC также наблюдается тенденция к снижению  $\alpha_2$ -связанности при переходе от покоя к задачным условиям при вариативных изменениях в  $\theta$ - и  $\beta$ -диапазонах в зависимости от сети и этапа эксперимента (Приложение 6). Ни один из описательных трендов AEC не достигает статистической значимости.

Таким образом, на групповом уровне функциональная связность характеризуется высокой устойчивостью при выполнении кратковременной когнитивной задачи как в тишине, так и при шумовом воздействии; выявленные изменения носят описательный характер. Описанные тренды не могут рассматриваться как доказательство функциональной перестройки сетей и используются только для уточнения направлений возможных изменений.

Данные демонстрируют, что кратковременная (~3 мин) когнитивная нагрузка и умеренное шумовое воздействие (70 дБ) не приводят к устойчивому изменению фазовой или амплитудной синхронности в пределах исследованных сетей. Это согласуется с данными исследований, показывающих, что изменения функциональной связности при умственном утомлении проявляются преимущественно при длительных и более нагружающих протоколах (Li et al., 2020; Wu et al., 2025).

Важную роль играет выраженная межиндивидуальная вариативность уровней связности. Работы, использующие мультимодальную оценку когнитивной гибкости, подчёркивают высокую индивидуальную специфичность сетевых маркеров гибкости и усталости; связь между нагрузкой и изменениями связности существенно варьирует между участниками (Jiang et al., 2024). При небольших выборках это приводит к снижению статистической мощности и затрудняет выявление устойчивых групповых эффектов, поэтому нейрофизиологические проявления нагрузки в данном дизайне ожидаемо выявляются преимущественно на уровне индивидуальных профилей.

Дополнительным фактором является ограниченная длительность состояния покоя (17–29 секунд), что не обеспечивает достаточного количества стабильных сегментов сигнала для точного расчёта коннективности. Методологические обзоры подчёркивают, что для надёжной оценки метрик функциональной связности требуется более длительная и стационарная запись (Friedman & Miyake, 2017) — в рамках настоящего исследования этот фактор рассматривался как ограничение.

Наконец, исследования утомления и эмоционального выгорания последних лет показывают, что значимые изменения связности чаще фиксируются при кумулятивной усталости, дефиците сна, длительных задачах или эмоционально насыщенных нагрузках (Afeq et al., 2025). В условиях умеренной нагрузки и короткой задачи нейросетевые механизмы могут сохранять функциональную стабильность, что и наблюдается в настоящем исследовании.

Таким образом, отсутствие значимых различий между условиями отражает устойчивость функциональной организации фронто-теменных сетей здоровых взрослых при умеренной когнитивной нагрузке и подчёркивает необходимость дальнейших исследований, ориентированных на более длительные или более ресурсозатратные протоколы.

Несмотря на отсутствие значимых групповых эффектов, анализ корреляций между метриками связности и данными опросника САН выявил ряд ассоциаций, которые могут отражать более напряжённый, ресурсозатратный режим функционирования лобно-теменной сети (*fronto\_par*) в диапазонах  $\theta$  и  $\alpha_1$ .

Во-первых, наблюдалась отрицательная связь между АЕС в  $\alpha_1$ -диапазоне во время выполнения первой задачи и настроением после неё: более высокая амплитудная когерентность  $\alpha_1$ -активности в лобно-теменной сети ассоциировалась с более низкими оценками настроения по САН после Test 1 ( $r$  порядка  $-0.7$ ). Сходная тенденция отмечалась и для фазовой связности в  $\alpha_1$  (wPLI): участники с более высокой лобно-теменной синхронизацией во время задания демонстрировали худшее субъективное настроение после его выполнения. Эти результаты могут указывать на то, что усиление координации в  $\alpha$ -диапазоне связано с более напряжённым и ресурсозатратным режимом работы сети, субъективно переживаемым как ухудшение эмоционального состояния.

Во-вторых, была обнаружена положительная связь между  $\theta$ -связанностью (wPLI в  $\theta$ -диапазоне) в лобно-теменной сети во время выполнения задачи при шуме (*cond3*) и настроением после второго теста (SAN Test 2). Участники с более высокой  $\theta$ -фазовой синхронизацией демонстрировали более благоприятный эмоциональный фон после выполнения задания в шумовых условиях. Это согласуется с трактовкой  $\theta$ -ритма как компонента механизмов контроля внимания, рабочей памяти и интеграции информации (Cavanagh & Frank, 2021).

В совокупности эти корреляции показывают, что при стабильности средних уровней связности индивидуальные различия в сетевой организации мозга систематически связаны с субъективным переживанием когнитивной нагрузки и шума. Вместе с тем часть корреляций находится на уровне тенденций и при жёстких поправках на множественные сравнения может не достигать формального критерия значимости; интерпретация проводится с осторожностью как указание на направления дальнейших исследований.

Анализ взаимосвязей метрик связности с показателями когнитивной продуктивности (по данным тестов Cognifit: время выполнения и точность) выявил ряд тенденций, прежде всего для лобно-теменной сети в  $\alpha_1$ -диапазоне.

Более высокая фазовая синхронизация (PLV и wPLI в  $\alpha_1$ ) во время выполнения первой задачи была связана с увеличением времени выполнения теста и тенденцией к повышению

точности. Такой профиль может отражать различия в стратегиях выполнения задания: участники с более сильной  $\alpha$ -координацией в лобно-теменной сети, вероятно, используют более контролируемый, «аккуратный» стиль решения, тратят больше времени и допускают меньше ошибок. Участники с более низкой  $\alpha$ -связностью могут действовать быстрее, но менее точно. При этом групповые средние могут не различаться, поскольку стратегии взаимно компенсируются.

Указанные связи преимущественно носят характер трендов и в сочетании с ограниченным объемом выборки не позволяют делать жесткие выводы. Отмечается корреляционный характер выявленных ассоциаций без вывода о причинно-следственных отношениях.

Сочетание отсутствия групповых различий по метрикам связности и наличия индивидуальных корреляций с показателями САН и Cognifit укладывается в концепцию устойчивых, но индивидуально вариативных функциональных сетей. На уровне группы лобно-теменные и теменно-височные связи сохраняют общий каркас взаимодействия, обеспечивающий выполнение задания как в тишине, так и при шумовом фоне. Межиндивидуальные различия в конфигурации и степени координации сетей оказываются значимыми для субъективного и поведенческого ответа.

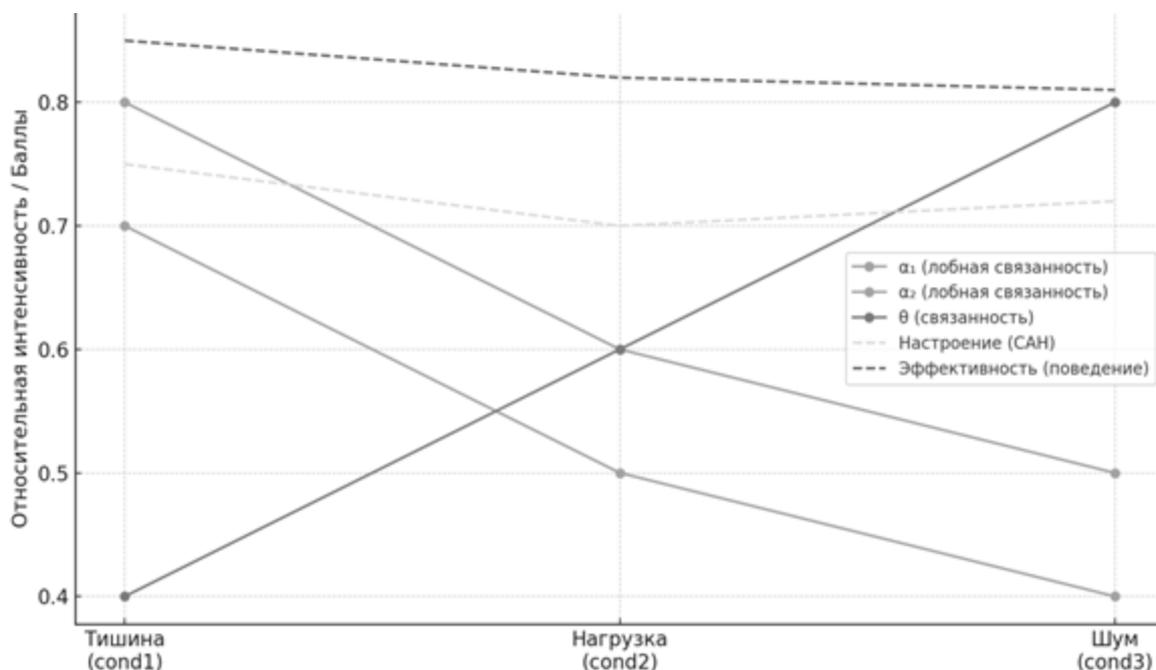
В рамках интерпретационной схемы работы, предполагается: (1)  $\theta$ -связность лобно-теменной сети отражает эффективность механизмов контроля и фильтрации информации, поддерживающих выполнение задачи в неблагоприятных условиях (в том числе при шуме), что может сопровождаться более благоприятным эмоциональным состоянием; (2)  $\alpha_1$ -связность, особенно по амплитудным огибающим (АЕС), может отражать вовлечение регуляторных и подавляющих механизмов (ингибция нерелевантной информации, стабилизация рабочей сети), которые при чрезмерной координации могут становиться ресурсозатратными и субъективно сопровождаться ухудшением настроения.

АЕС дополняет фазовые метрики: адаптация к нагрузке может проявляться не в перестройке фазовой синхронизации, а в перераспределении амплитудных ресурсов между сетями. В первом блоке отмечалась тенденция к повышению  $\theta$ - и  $\beta$ -связности по АЕС в ряде сетей, что может отражать мобилизацию когнитивного контроля и поддержание устойчивой когнитивной установки. Во втором блоке, особенно при шумовом воздействии, наблюдалось систематическое снижение  $\alpha_2$ -связности во всех сетях, что может указывать на ослабление альфа-торможения и/или истощение регулирующих механизмов при нарастающей нагрузке.

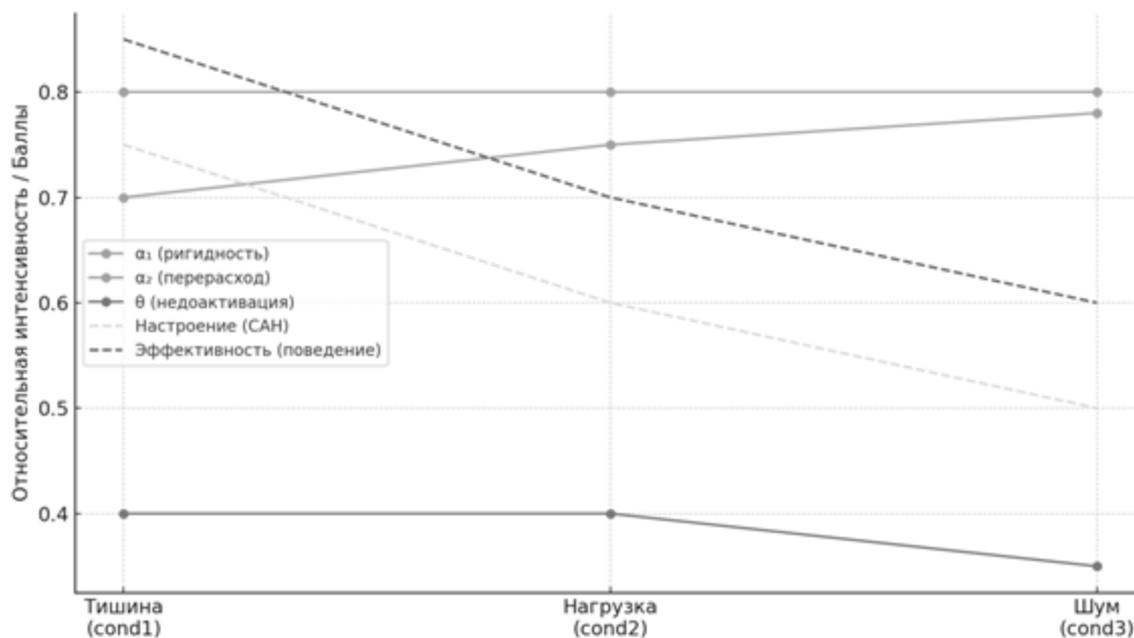
Сопоставление нейрофизиологических ритмов, поведенческих показателей и субъективной оценки состояния позволило условно выделить два паттерна адаптации к сенсорной и когнитивной нагрузке (на уровне тенденции), требующих проверки на расширенной выборке. Выделение паттернов носит эвристический характер и рассматривается как предварительное типологическое описание.

У части испытуемых (9 из 17) прослеживается адаптивная стратегия: высокая  $\alpha_1$ -связность в состоянии покоя; снижение  $\alpha_2$ -связности в шуме; рост  $\theta$ -связности; сохранение уровня самочувствия и точности выполнения задачи (рис. 2). У другой части (8 из 17) наблюдается неадаптивная стратегия:  $\alpha_1$ -связность сохраняется или усиливается,  $\theta$ -активация отсутствует, показатели самочувствия и точности снижаются (рис. 4). Отмечается, что повышение точности и скорости во втором блоке может частично объясняться эффектом повторного выполнения (practice effect) и адаптацией к процедуре тестирования; для разделения эффектов порядка и акустического воздействия в дальнейшем целесообразны контрбалансировка порядка условий и/или дополнительный контрольный блок без шума.

Следует подчеркнуть, что данное разделение носит описательный характер и основано на визуальном сопоставлении индивидуальных профилей без применения формализованных методов классификации или кластерного анализа.



**Рисунок 4 – Профиль эффективной стратегии адаптации (пример)**



**Рисунок 5 – Профиль неэффективной стратегии адаптации (пример)**

Выделение указанных паттернов носит исключительно иллюстративный характер, не основано на формализованных методах кластеризации и не предполагает статистического сравнения подгрупп.

Настоящее исследование имеет ряд методологических ограничений, которые следует учитывать при интерпретации результатов. Длительность состояния покоя после очистки составляла 17–29 секунд, что ограничивает надёжность оценки фоновой функциональной связности. Для устойчивых расчётов wPLI, PLV и АЕС требуется существенно больший объём данных, особенно при анализе низкочастотных ритмов (Friedman & Miyake, 2017). В связи с ограниченной длительностью записи состояния покоя (17–29 с) показатели функциональной связности в этом состоянии используются преимущественно как относительный базовый уровень, а не как стабильная характеристика фоновой сетевой организации.

Эффекты когнитивной усталости обычно проявляются при более длительных (10–20 минут и более) нагрузках. Краткие задания (2–5 минут) реже вызывают устойчивые изменения в сетевых показателях ЭЭГ, что согласуется с полученными результатами (Li et al., 2020; Wu et al., 2025).

Следует отметить, что фиксированный порядок предъявления условий («тишина → шум») не позволяет полностью разделить эффекты акустического воздействия и эффекты повторного выполнения задания; полученные различия по поведенческим показателям интерпретируются с учётом данного ограничения.

Шум open-space 70 дБ соответствует реальной офисной среде и не относится к сильным стрессорам. В рамках данного протокола мягкость стрессора могла ограничить выявление значимых эффектов.

Показатели связности связаны с индивидуальными когнитивными профилями и особенностями нейросетевой архитектуры (Jiang et al., 2024; Uddin, 2021). При небольшой выборке межиндивидуальная вариативность снижает статистическую мощность групповых сравнений.

В работе рассматривались четыре диапазона ( $\theta$ ,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\beta$ ) и четыре сети. Отсутствие анализа гамма-диапазона, динамической связности и directed connectivity могло ограничить полноту анализа.

С учётом изложенных ограничений перспективными направлениями дальнейшей работы являются: увеличение длительности записей покоя и задачных периодов, введение повторных блоков для оценки кумулятивной усталости; использование более интенсивных или многоуровневых нагрузок; применение анализа динамической и направленной связности; акцент на индивидуализированных нейросетевых профилях; развитие мультимодальных протоколов (ЭЭГ + поведение + субъективные шкалы и, при расширении дизайна, возможное подключение дополнительных методов регистрации).

Результаты исследования показывают, что при умеренной когнитивной нагрузке и шумовом воздействии (70 дБ) функциональная связность мозга остаётся стабильной по основным метрикам (wPLI, PLV, АЕС), что указывает на устойчивость фронтально-теменной сети и связанных исполнительных систем при кратковременных нагрузках (Cole, 2024; Uddin, 2021).

Дополнительным выводом является высокая межиндивидуальная вариативность показателей связности. Индивидуальные сетевые профили когнитивной гибкости и реакции на нагрузку существенно различаются и требуют персонализированного анализа (Jiang et al., 2024).

Стабильность метрик связности согласуется с данными о том, что кратковременные задачи реже вызывают выраженные изменения коннективности, тогда как устойчивые сдвиги выявляются при длительных или стрессогенных нагрузках, включая накопленную когнитивную усталость и эмоциональное истощение (Li et al., 2020; Afek et al., 2025; Wu et al., 2025).

В совокупности данные позволяют сформулировать два ключевых вывода: (1) групповые показатели функциональной связности демонстрируют повторяющиеся индивидуальные тенденции при умеренной кратковременной когнитивной нагрузке и шумовом фоне; (2)

индивидуальные различия в сетевой организации имеют существенное значение, включая вариации в реакции на шум и стратегии выполнения задания, что подтверждает необходимость дальнейших исследований с более длительными задачами, динамическим анализом связности и построением индивидуальных сетевых траекторий.

## Заключение

Цель исследования — изучение изменений когнитивной гибкости в условиях когнитивной нагрузки с использованием нейрофизиологических, поведенческих и субъективных показателей — была достигнута. В эксперименте применён мультимодальный подход, включавший регистрацию ЭЭГ, выполнение стандартизированной когнитивной задачи (Cognifit) и оценку функционального состояния по шкале САН.

По субъективным показателям (САН) выявлен направленный тренд к снижению самочувствия, активности и настроения от baseline к условию выполнения задачи при шумовом фоне; однако глобальные различия между тремя временными точками и парные сравнения не достигли статистической значимости после поправок, что позволяет трактовать изменения как тенденциальные.

На поведенческом уровне (Cognifit) показано статистически значимое улучшение показателей во втором блоке по сравнению с первым: сокращение времени выполнения, рост точности и увеличение интегрального показателя эффективности, с большими размерами эффекта. При интерпретации учитывается возможность влияния эффекта повторного выполнения задания (practice effect) и адаптации к процедуре тестирования.

На уровне групповых нейрофизиологических показателей функциональной связности (wPLI, PLV, AEC) статистически значимых различий между состояниями покоя, выполнением задачи в тишине и выполнением задачи при шуме не выявлено ( $p > 0.05$ ). По метрикам wPLI и AEC на уровне описательных данных отмечается систематическое снижение  $\alpha_2$ -связанности при переходе от покоя к задачным условиям, однако данные тренды не подтверждены статистически в рамках используемого объёма выборки и длительности записей.

Анализ индивидуальных взаимосвязей показал содержательные ассоциации между показателями связности лобно-теменной сети (в диапазонах  $\theta$  и  $\alpha_1$ ) и субъективными и поведенческими характеристиками выполнения задания. На основе сопоставления ЭЭГ-показателей, данных САН и результатов Cognifit в ВКР выделены два тенденциальных условных паттерна адаптации к нагрузке: адаптивный (9 из 17) и неадаптивный (8 из 17). Указанная типологизация носит предварительный, эвристический характер и требует проверки на расширенной выборке.

Ограничениями исследования являются малый объём и однородность выборки ( $N = 17$ , только женщины; исходно  $N = 18$ , один участник исключён на этапе предобработки), короткая длительность записи состояния покоя (17–29 секунд), умеренная длительность когнитивной нагрузки (~3 минуты) и умеренная интенсивность шумового воздействия (70 дБ). Эти факторы ограничивают статистическую мощность и надёжность оценки коннективности и определяют необходимость дальнейших исследований с увеличением длительности протокола, расширением выборки и применением более детализированных подходов к анализу сетевой динамики. Поскольку выборка включала только женщин, результаты не могут быть напрямую обобщены на мужскую популяцию; известны данные о половых различиях в ЭЭГ-ритмах и реакциях на когнитивную нагрузку.

## Библиография

1. Афек Н., Харматиук Д., Гавловска М., Феррейра Дж. М. А., Голонка К., Тукарьев С., Попов А., Марек Т. Функциональная связность при синдроме выгорания: исследование ЭЭГ в состоянии покоя // *Frontiers in Human Neuroscience*. 2025. Т. 19. Статья 1481760. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2025.1481760>
2. Бастос А.М., Шоффелен Дж.М. Обучающий обзор методов анализа функциональной связности и их интерпретационных ловушек // *Frontiers in Systems Neuroscience*. 2016. Т. 9. С. 175. DOI: 10.3389/fnsys.2015.00175. <https://doi.org/10.3389/fnsys.2015.00175>
3. Бай Й., Цзян Ц., Ху Дж., Ли Й. Обработка эмоций в виртуальной реальности: функциональная связность ЭЭГ с использованием взвешенного индекса фазового отставания // Ежегодная международная конференция IEEE по биомедицинской инженерии. 2025. С. 1-4. DOI: 10.1109/EMBC58623.2025.11253529. <https://doi.org/10.1109/EMBC58623.2025.11253529>
4. Винк М., Остенвельд Р., ван Вингерден М., Батталья Ф., Пеннарц К.М. Улучшенный индекс фазовой синхронизации для электрофизиологических данных при наличии объемной проводимости, шума и смещения размера выборки // *Neuroimage*. 2011. Т. 55, № 4. С. 1548–1565. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2011.01.055. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.01.055>
5. Годфри М., Сингх К.Д. Измерение надежной функциональной связности по МЭГ состояния покоя с использованием корреляции амплитуды и энтропии по частотным диапазонам и временным масштабам // *Neuroimage*. 2021. Т. 226. С. 117551. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2020.117551. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.117551>
6. Джагани Д.Р., Уддин Л.К. Демистификация когнитивной гибкости: последствия для клинической нейробиологии и нейробиологии развития // *Trends in Neurosciences*. 2015. Т. 38, № 9. С. 571–578. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2015.07.003>
7. Дзян Л., Эйхофф С.Б., Генон С., Ван Г., Йи К., Хе Р., Хуан Х., Яо Д.Ч., Донг Д., Ли Ф., Сюй П. Мультимодальная ковариационная сеть отражает индивидуальную когнитивную гибкость // *International Journal of Neural Systems*. 2024. Т. 34, № 4. Статья 2450018. DOI: 10.1142/S0129065724500187. <https://doi.org/10.3390/electronics13183742>
8. Ионеску Т. Исследование природы когнитивной гибкости // *New Ideas in Psychology*. 2012. Т. 30, № 2. С. 190–200. <https://doi.org/10.1016/j.newideapsych.2011.11.001>
9. Кей В., Чен Т., Самеитат А.Дж., Менон В. Динамическая реконфигурация фронто-теменных контрольных сетей лежит в основе адаптивной когнитивной гибкости // *Nature Communications*. 2023. Т. 14, № 1. Статья 2460. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-38144-8>
10. Коул Майкл У. Когнитивная гибкость как смещение потоков нейронной сети гибкими нейронными представлениями // *Current Opinion in Behavioral Sciences*. 2024. Т. 57. С. 101384. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2024.101384>
11. Лахо Ж.П., Родригес Е., Мартинери Ж., Варела Ф.Ж. Измерение фазовой синхронизации в сигналах мозга // *Human Brain Mapping*. 1999. Т. 8, № 4. С. 194–208. DOI: 10.1002/(SICI)1097-0193(1999)8:4<194::AID-HBM4>3.0.CO;2-C.
12. Ли Г., Хуан С., Сюй В. и др. Влияние умственной усталости на активность мозга: сравнительное исследование как в состоянии покоя, так и в состоянии выполнения задачи с использованием ЭЭГ // *BMC Neuroscience*. 2020. Т. 21. Статья 20. <https://doi.org/10.1186/s12868-020-00569-1>
13. Лиз И. Ли, Мэйрид П. Хили, Настасья Л. Фишер, Ке Тонг, Аннабель Ш. Чен, Барбара Дж. Саакян, Зои Курци. Тренировка когнитивной гибкости для воздействия в реальных условиях // *Current Opinion in Behavioral Sciences*. 2024. Т. 59. С. 101413. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2024.101413>
14. Маклохлин Г., Дьюркович М., Палмер Дж.А., Мейкиг С. Среднелобная тета-активность при психических заболеваниях: показатель когнитивной уязвимости при различных расстройствах // *Biological Psychiatry*. 2021. Т. 91, вып. 2. DOI: 10.1016/j.biopsych.2021.08.020. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2021.08.020>
15. Марк Г., Гудит Д., Клоке У. Стоимость прерванной работы: большая скорость и стресс // *Труды конференции по человеческому фактору в вычислительных системах*. 2008. С. 107–110. DOI: 10.1145/1357054.1357072. <https://doi.org/10.1145/1357054.1357072>
16. Саддагани С., Кляйншмидт А. Сети мозга и  $\alpha$ -осцилляции: структурные и функциональные основы когнитивного контроля // *Trends in Cognitive Sciences*. 2016. Т. 20, № 11. С. 805–817. DOI: 10.1016/j.tics.2016.09.004. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2016.09.004>
17. Самаей Б. Шафи, Саид Шадпур, Амбреен Шафкат. Оценка умственной нагрузки с использованием взвешенного индекса фазового запаздывания и когерентных признаков, извлеченных из данных ЭЭГ // *Brain Research Bulletin*. 2024. Т. 214. С. 110992. <https://doi.org/10.1016/j.brainresbull.2024.110992>
18. Уддин Л.К. Когнитивная и поведенческая гибкость: нейронные механизмы и клинические соображения // *Nature Reviews Neuroscience*. 2021. Т. 22, № 3. С. 167–179. DOI: 10.1038/s41583-021-00428-w. <https://doi.org/10.1038/s41583-021-00428-w>

19. Фридман Н.П., Мияке А. Единство и разнообразие исполнительных функций: индивидуальные различия как окно в когнитивную структуру // *Cortex*. 2017. Т. 86. С. 186-204. DOI: 10.1016/j.cortex.2016.04.023. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2016.04.023>
20. Фрис П. Ритмы для познания: общение через когерентность // *Neuron*. 2015. Т. 88, № 1. С. 220-35. DOI: 10.1016/j.neuron.2015.09.034. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2015.09.034>
21. Хол К., Долкос С. Измерение когнитивной гибкости: краткий обзор нейропсихологических, самоотчетных и нейронаучных подходов // *Frontiers in Human Neuroscience*. 2024. Т. 18. Статья 1331960. DOI: 10.3389/fnhum.2024.1331960. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2024.1331960>
22. Чанг В., Ни В., Льв Р., Чжэн Л., Лу Дж., Ян Г. Обнаружение состояния усталости водителя на основе пространственных характеристик сигналов ЭЭГ // *Electronics*. 2024. Т. 13, № 18. С. 3742. <https://doi.org/10.3390/electronics13183742>
23. Каванах Дж.Ф., Франк М.Дж. Лобная тета как механизм когнитивного контроля // *Trends in Cognitive Sciences*. 2021. Т. 25, № 7. С. 591–604. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2021.04.002>
24. Ван Й., Чен Й., Цуй Й., Чжао Т., Ван Б., Чжэн Й., Рен Й., Ша С., Ян Й., Чжао Х., Чжан Л., Ван Г. Изменения функциональной связности электроэнцефалограммы у лиц с большим депрессивным расстройством: исследование электроэнцефалограммы в состоянии покоя // *Frontiers in Neuroscience*. 2024. Т. 18. Статья 1412591. DOI: 10.3389/fnins.2024.1412591. <https://doi.org/10.3389/fnins.2024.1412591>
25. У Дж., Гуань Ц., Ли Ц. и др. Функциональная связность мозга после когнитивной усталости, вызванной задачей Струпа // *Scientific Reports*. 2025. Т. 15. Статья 22342. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-08330-6>

## Neurophysiological Correlates of Cognitive Flexibility under Moderate Cognitive Load: A Pilot Multimodal EEG Study

**Elena A. Litash-Sorokina**

Postgraduate Student,  
Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration,  
119571, 84, Vernadskogo ave., Moscow, Russian Federation;  
Master's Student,  
Moscow Institute of Psychoanalysis,  
123007, 34/14, Kutuzovsky ave., Moscow, Russian Federation;  
e-mail: elena@lita.sh

### Abstract

This pilot multimodal study aimed to investigate the neural network correlates of cognitive flexibility under conditions of increased cognitive and acoustic load using electroencephalography (EEG). Data from 17 healthy women were included in the final analysis (initial N = 18; one recording was excluded during the EEG preprocessing stage). The experiment had a within-subject design and included a resting state, performance of a cognitive task in silence, and performance of the same task under acoustic stimulation (70 dB). Assessment of cognitive performance was conducted using the CogniFit test battery, and subjective functional state was evaluated using the SAN (Mood, Activity, and Well-being) method. EEG functional connectivity was analyzed using phase-based (PLV, wPLI) and amplitude-based (AEC) metrics in theta, alpha, and beta frequency bands for frontal, fronto-parietal, parietal, and temporo-parietal networks. No statistically significant group differences in functional connectivity metrics between experimental conditions were found. However, at the individual level, tendencies for reorganization of network interactions were detected, primarily in the theta and alpha frequency bands, associated with differences in task

performance strategies reflecting a balance between speed and accuracy. The obtained results indicate pronounced inter-individual variability in the neurophysiological mechanisms of cognitive flexibility under load and emphasize the informativeness of an individually oriented analysis of EEG functional connectivity in pilot studies.

### For citation

Litash-Sorokina E.A. (2025) Neyrofiziologicheskiye korrelyaty kognitivnoy gibkosti pri umerennoy kognitivnoy nagruzke: pilotnoye multimodal'noye YeYeG-issledovaniye [Neurophysiological Correlates of Cognitive Flexibility under Moderate Cognitive Load: A Pilot Multimodal EEG Study]. *Psikhologiya. Istoriko-kriticheskie obzory i sovremennyye issledovaniya* [Psychology. Historical-critical Reviews and Current Researches], 14 (12A), pp. 224-241. DOI: 10.34670/AR.2026.33.92.016

### Keywords

Cognitive flexibility, EEG functional connectivity, cognitive load, acoustic load, executive functions, alpha rhythm, theta rhythm, multimodal study, pilot study, neurophysiological markers.

## References

1. Afek, N., Harmatiuk, D., Gawłowska, M., Ferreira, J. M. A., Golonka, K., Tukaiev, S., Popov, A., & Marek, T. (2025) Functional connectivity in burnout syndrome: A resting-state EEG study. *Frontiers in Human Neuroscience*, 19, Article 1481760. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2025.1481760>
2. Bai, Y., Jiang, C., Hu, J., & Li, Y. (2025) Emotion processing in virtual reality: EEG functional connectivity using weighted phase lag index. In *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)* (pp. 1-4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/EMBC58623.2025.11253529>
3. Bastos, A. M., & Schoffelen, J. M. (2016). A tutorial review of functional connectivity analysis methods and their interpretational pitfalls. *Frontiers in Systems Neuroscience*, 9, 175. <https://doi.org/10.3389/fnsys.2015.00175>
4. Cai, W., Chen, T., Szameitat, A. J., & Menon, V. (2023). Dynamic reconfiguration of frontoparietal control networks underlies adaptive cognitive flexibility. *Nature Communications*, 14(1), 2460. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-38144-8>
5. Cavanagh, J. F., & Frank, M. J. (2021). Frontal theta as a mechanism for cognitive control. *Trends in Cognitive Sciences*, 25(7), 591–604. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2021.04.002>
6. Chang, W., Nie, W., Lv, R., Zheng, L., Lu, J., & Yan, G. (2024). Fatigue driving state detection based on spatial characteristics of EEG signals. *Electronics*, 13(18), 3742. <https://doi.org/10.3390/electronics13183742>
7. Cole, M. W. (2024). Cognitive flexibility as the shifting of brain network flows by flexible neural representations. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 57, 101384. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2024.101384>
8. Dajani, D. R., & Uddin, L. Q. (2015). Demystifying cognitive flexibility: Implications for clinical and developmental neuroscience. *Trends in Neurosciences*, 38(9), 571–578. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2015.07.003>
9. Friedman, N. P., & Miyake, A. (2017). Unity and diversity of executive functions: Individual differences as a window on cognitive structure. *Cortex*, 86, 186–204. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2016.04.023>
10. Fries, P. (2015). Rhythms for cognition: Communication through coherence. *Neuron*, 88(1), 220–235. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2015.09.034>
11. Godfrey, M., & Singh, K. D. (2021). Measuring robust functional connectivity from resting-state MEG using amplitude and entropy correlation across frequency bands and temporal scales. *NeuroImage*, 226, 117551. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.117551>
12. Hohl, K., & Dolcos, S. (2024). Measuring cognitive flexibility: A brief review of neuropsychological, self-report, and neuroscientific approaches. *Frontiers in Human Neuroscience*, 18, 1331960. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2024.1331960>
13. Ionescu, T. (2012). Exploring the nature of cognitive flexibility. *New Ideas in Psychology*, 30(2), 190–200. <https://doi.org/10.1016/j.newideapsych.2011.11.001>
14. Jiang, L., Eickhoff, S. B., Genon, S., Wang, G., Yi, C., He, R., Huang, X., Yao, D. Z., Dong, D., Li, F., & Xu, P. (2024). Multimodal covariance network reflects individual cognitive flexibility. *International Journal of Neural Systems*, 34(4), 2450018. <https://doi.org/10.1142/S0129065724500187>
15. Lachaux, J. P., Rodriguez, E., Martinerie, J., & Varela, F. J. (1999). Measuring phase synchrony in brain signals. *Human Brain Mapping*, 8(4), 194–208. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0193\(1999\)8:4<194::AID-HBM4>3.0.CO;2-C](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0193(1999)8:4<194::AID-HBM4>3.0.CO;2-C)

16. Lee, L. Y., Healy, M. P., Fischer, N. L., Tong, K., Chen, A. S., Sahakian, B. J., & Kourtzi, Z. (2024). Cognitive flexibility training for impact in real-world settings. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 59, 101413. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2024.101413>
17. Li, G., Huang, S., Xu, W., Jiao, W., Jiang, Y., Gao, Z., & Zhang, Y. (2020). The impact of mental fatigue on brain activity: A comparative study both in resting state and task state using EEG. *BMC Neuroscience*, 21, 20. <https://doi.org/10.1186/s12868-020-00569-1>
18. Mark, G., Gudith, D., & Klocke, U. (2008). The cost of interrupted work: More speed and stress. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 107–110). ACM. <https://doi.org/10.1145/1357054.1357072>
19. McLoughlin, G., Gyurkovics, M., Palmer, J. A., & Makeig, S. (2021). Midfrontal theta activity in psychiatric illness: An index of cognitive vulnerabilities across disorders. *Biological Psychiatry*, 91(2), 173–183. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2021.08.020>
20. Sadaghiani, S., & Kleinschmidt, A. (2016). Brain networks and  $\alpha$ -oscillations: Structural and functional foundations of cognitive control. *Trends in Cognitive Sciences*, 20(11), 805–817. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2016.09.004>
21. Shafiei, S. B., Shadpour, S., & Shafqat, A. (2024). Mental workload evaluation using weighted phase lag index and coherence features extracted from EEG data. *Brain Research Bulletin*, 214, 110992. <https://doi.org/10.1016/j.brainresbull.2024.110992>
22. Uddin, L. Q. (2021). Cognitive and behavioural flexibility: Neural mechanisms and clinical considerations. *Nature Reviews Neuroscience*, 22(3), 167–179. <https://doi.org/10.1038/s41583-021-00428-w>
23. Vinck, M., Oostenveld, R., van Wingerden, M., Battaglia, F., & Pennartz, C. M. (2011). An improved index of phase-synchronization for electrophysiological data in the presence of volume-conduction, noise and sample-size bias. *NeuroImage*, 55(4), 1548–1565. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.01.055>
24. Wang, Y., Chen, Y., Cui, Y., Zhao, T., Wang, B., Zheng, Y., Ren, Y., Sha, S., Yan, Y., Zhao, X., Zhang, L., & Wang, G. (2024). Alterations in electroencephalographic functional connectivity in individuals with major depressive disorder: A resting-state electroencephalogram study. *Frontiers in Neuroscience*, 18, 1412591. <https://doi.org/10.3389/fnins.2024.1412591>
25. Wu, J., Guan, Z., Li, C., Ma, Y., & Wang, X. (2025) Brain functional connectivity after Stroop task induced cognitive fatigue. *Scientific Reports*, 15, 22342. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-08330-6>