

ФИЗИОЛОГИЯ ВЫСШЕЙ НЕРВНОЙ (КОГНИТИВНОЙ) ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА

УДК 612.821

КОГЕРЕНТНОСТЬ ТЕТА1-ДИАПАЗОНА ЭЭГ В СОСТОЯНИИ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ПОКОЯ И ПРИ ТЕСТИРОВАНИИ ВНИМАНИЯ У ИСПЫТУЕМЫХ С РАЗНОЙ ЛИЧНОСТНОЙ ТРЕВОЖНОСТЬЮ

© 2023 г. Т. Д. Джебраилова¹, *, И. И. Коробейникова², **, Н. А. Каратыгин²,
Я. А. Венерина¹, Е. В. Янтикова¹

¹ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова (Сеченовский Университет), Москва, Россия

²ФГБНУ “НИИ нормальной физиологии им. П.К. Анохина”, Москва, Россия

*e-mail: dzhebrailova@mail.ru

**e-mail: i_korobeinikova@mail.ru

Поступила в редакцию 03.06.2022 г.

После доработки 08.08.2022 г.

Принята к публикации 31.10.2022 г.

Тревожность оказывает существенное влияние на эффективность когнитивной деятельности, которое может быть обусловлено особенностями организации произвольного и непроизвольного внимания у индивидов с разной тревожностью. Цель: на основе когерентного анализа тета1-диапазона ЭЭГ (4–6 Гц) провести исследование функциональных корковых связей в состоянии относительного покоя и при выполнении теста на внимание у испытуемых с разной личностной тревожностью. Анализировали когерентность тета1-диапазона ЭЭГ у испытуемых (43 чел., мужчины в возрасте 19–21 года) с низкой, средней и высокой личностной тревожностью (ЛТ, по Ч.Д. Спилбергеру) в трех экспериментальных ситуациях: состояние относительного покоя при закрытых глазах, исходное состояние перед выполнением теста (при открытых глазах) и во время выполнения теста (красно-черные таблицы Ф.Д. Горбова). У испытуемых с высокой ЛТ в состоянии относительного покоя наблюдалась меньшая правополушарная когерентность тета1-диапазона ЭЭГ в системе взаимосвязей с фокусом в височном отведении. В исходном состоянии при открытых глазах и при выполнении теста у индивидов с высокой ЛТ отмечалась большая межполушарная когерентность тета1-диапазона ЭЭГ. Наибольшая лабильность структуры когерентных взаимосвязей в тета1-диапазоне ЭЭГ наблюдалась у испытуемых со средней ЛТ, у которых отмечалось повышение преимущественно межполушарной когерентности большинства областей коры при выполнении теста по сравнению с исходным состоянием. Для индивидов с высокой ЛТ была характерна относительная инертность структуры когерентных взаимосвязей в тета1-диапазоне ЭЭГ на этапах обследования. Результаты исследования свидетельствуют о том, что личностная тревожность является одним из факторов, модулирующих организацию нейрокогнитивных сетей, как в состоянии относительного покоя, так и при тестировании внимания.

Ключевые слова: тревожность, внимание, когерентность, тета1-диапазон ЭЭГ

DOI: 10.31857/S0044467723020041, **EDN:** IFTQLH

Личностная тревожность предрасполагает человека к восприятию широкого круга объективно безопасных обстоятельств как содержащих угрозу (Spielberger et al., 1995; Хекхаузен, 2003). Одним из признаков высокой личностной тревожности является избирательное усиление непроизвольного внимания к внешним потенциально опасным стимулам и снижение эффективности системы

произвольного внимания (Eysenck et al., 2007), особенно в ситуациях, требующих перераспределения когнитивных ресурсов (Jaiswal et al., 2019). Хорошо известно, что зависимость между тревожностью и эффективностью деятельности описывается инвертированной “U-образной” кривой, при этом максимальная эффективность соответствует некоторому среднему или оптимальному

уровню тревожности (Хекхаузен, 2003). С другой стороны, известно, что люди с повышенной тревожностью не обязательно менее успешны, и способны повысить качество решения поведенческих задач за счет усиления произвольного контроля над вниманием, при этом они вынуждены затрачивать на выполнение заданий больше усилий, чем низкотреховные (Eysenck et al., 2007). Можно полагать, что одними из наиболее важных факторов, влияющих на эффективность когнитивной деятельности и ее физиологическое обеспечение в зависимости от уровня тревожности, являются особенности организации произвольного и непроизвольного внимания.

Согласно современным представлениям, познавательная деятельность и целенаправленное поведение обеспечиваются распределенными нейронными сетями — специфическими для конкретного вида деятельности ансамблями взаимодействующих макроскопических структур мозга (Bressler, Menon, 2010; Мачинская и др., 2019). Основным механизмом формирования таких ансамблей является модуляция силы функциональных связей между их участниками (Pessoa, 2018). Для исследования нейронных объединений, участвующих в реализации когнитивной деятельности, может быть использован когерентный анализ ЭЭГ, позволяющий оценить функциональное взаимодействие корковых зон на коротких временных промежутках, что способствует более точной оценке мозгового обеспечения быстро изменяющихся во времени когнитивных процессов (Мачинская и др., 2016).

Выбор для когерентного анализа именно тета-диапазона ЭЭГ обусловлен двумя основными причинами. Во-первых, в литературе приводятся сведения о связи тревожности и спектрально-когерентных характеристик тета-диапазона ЭЭГ. В частности, показано, что у тревожных испытуемых представительство тета-ритма в передней цингулярной и орбитофронтальной коре выше, чем у низкотреховных испытуемых (Jaiswal et al., 2019), а фронтально-медиальный тета-ритм предлагается рассматривать как неотъемлемую составляющую состояния тревоги у человека (Sperl et al., 2019). В то же время данные о взаимосвязи когерентности потенциалов тета-диапазона ЭЭГ с тревожностью достаточно противоречивы. Согласно клиническим данным, у пациентов с тревожными расстройствами в фоновом состоянии отмечался высокий коэффициент когерентности тета-

диапазона в срединных фронтальных областях (Xing et al., 2017; Al-Ezzi et al., 2020). Повышение внутриполушарной когерентности между лобными и затылочными областями на частоте тета-ритма рассматривается как генерализованный симптом тревоги (Saunders et al., 2016; Schoenberg, 2020). С другой стороны, у высокотреховных лиц отмечается снижение межполушарных функциональных взаимодействий в тета-диапазоне во фронтальных и внутриполушарных взаимосвязях в височных областях коры головного мозга (Hanaoka et al., 2005; Грибанов и др., 2013). У высокотреховных испытуемых в фоновом состоянии показан низкий уровень внутриполушарных функциональных взаимодействий между медиальной префронтальной, правой задней цингулярной и ретроспленальной корой на частоте тета-ритма (Imperatori et al., 2019; Schoenberg, 2020).

А во-вторых, выбор тета-ритма обусловлен хорошо известной ролью ритмических осцилляций тета-диапазона в обеспечении ориентировочной реакции, поддержания внимания и рабочей памяти (Sauseng et al., 2009; Мачинская и др., 2016; VanRullen, 2018; Helfrich et al., 2018). Показано, что при поступлении новой информации усиливается когерентность между гиппокампом и отделами коры, ответственными за эпизодическую память и планирование действий, прежде всего дорзолатеральной и медиальной префронтальной корой (Мысин, 2020). Большое разнообразие теоретических идей о том, как тета-ритм участвует в операциях обработки информации на нейронном уровне, связано в значительной степени с многообразием представлений о функциях самого гиппокампа (Мысин, 2020). В рамках осцилляторной модели (Clayton et al., 2015) устойчивое внимание опирается на фронтомедиальные тета-колебания, межрегиональную коммуникацию посредством низкочастотной фазовой синхронизации, а также селективное возбуждение и торможение когнитивной обработки посредством гамма- и альфа-колебаний соответственно. По мнению ряда авторов, тета-осцилляции имеют отношение скорее к комплексным функциональным состояниям мозга, чем к специфическим процессам в нем, отражая функциональное связывание дистантно расположенных нейрональных ансамблей, а собственно процесс связывания формирует источники тета-активности, ре-

гистрируемые с помощью поверхностной ЭЭГ (Womelsdorf, 2010; Афтанас и др., 2013).

При изучении функциональной значимости тета-ритма, наряду с рассмотрением единого тета-диапазона, например, 4.0–7.5 Гц (Мачинская и др., 2016), во многих исследованиях выделяются поддиапазоны тета-активности, в частности, в границах 4–6 Гц (тета1) и 6–8 Гц (тета2) (Афтанас и др., 2013; Ребрейкина и др., 2015). При анализе спектральной мощности основных ритмов ЭЭГ было обнаружено, что при выполнении теста на внимание по сравнению с исходным состоянием у испытуемых с разной тревожностью повышалась спектральная мощность тета1-диапазона ЭЭГ большинства областей коры и практически не изменялась мощность тета2-диапазона (Джебраилова и др., 2021). Ранее были выявлены различия характеристик тета1- и тета2-активности при выполнении тестов, требующих логического мышления, при этом обнаружено определенное сходство динамики мощности и когерентности потенциалов тета2-диапазона с динамикой параметров альфа-ритма ЭЭГ, в частности наблюдалась десинхронизация тета2 при открывании глаз (Джебраилова и др., 2018). В этой связи целесообразно напомнить предложение (Klimesch, 1999) о выделении трех поддиапазонов альфа-ритма (альфа1, альфа2 и альфа3), границы которых определяются на основе индивидуальной частоты пика в альфа-диапазоне ЭЭГ и при частоте альфа-пика в 10 Гц соответствуют диапазонам 6–8, 8–10 и 10–12 Гц. Таким образом, по крайней мере у части испытуемых активность 6–8 Гц функционально относится к альфа-диапазону ЭЭГ. Исходя из этих соображений, в представляемой работе мы анализировали когерентность тета1-диапазона ЭЭГ.

Цель: на основе когерентного анализа потенциалов тета1-диапазона (4–6 Гц) ЭЭГ провести исследование функциональных корковых связей в состоянии относительного покоя и при выполнении теста на концентрацию и скорость переключения внимания (тест Ф.Д. Горбова) у испытуемых с разным уровнем личностной тревожности.

В литературе приводятся многочисленные сведения о влиянии стероидных гормонов на функции головного мозга, функциональную активность отдельных структур, состояние нейромедиаторных систем, формирование психического статуса, эмоций, обучения, памяти и поведения (Иванова и др., 2018). Хо-

рошо известно, что тревожность находится в тесной зависимости от флюктуации половых гормонов, которая наблюдается у женщин в ходе овариального цикла (Angst et al., 2001). Зависимость эффективности когнитивной деятельности и психоэмоционального напряжения от нейрогуморального состояния определяет необходимость учета фазы цикла женщин-испытуемых при физиологических и психофизиологических исследованиях (Базанова О.М. и др., 2013). Исследование взаимосвязей тревожности, когнитивных функций и их физиологического обеспечения у женщин, а также выявление особенностей таких взаимосвязей у мужчин и женщин, безусловно, остается важной задачей физиологии, однако не являлось целью нашей работы. Именно поэтому в нашем исследовании принимали участие только испытуемые – мужчины.

МЕТОДИКА

В исследовании на основе добровольного информированного согласия приняли участие 43 студента, юноши 19–21 года, правши с нормальной остротой зрения.

Организация обследования:

1) ознакомление испытуемых с процедурой обследования; 2) заполнение бланков информированного согласия и психологических тестов; 3) установка электродов; 4) регистрация ЭЭГ в состоянии относительного покоя при закрытых глазах (Ф1); 5) инструкция по выполнению теста на внимание; 6) регистрация ЭЭГ в исходном состоянии перед выполнением теста при открытых глазах (Ф2); 7) регистрация ЭЭГ во время выполнения теста (Тест) на внимание.

Психологическое тестирование: у испытуемых тестировали личностную (ЛТ) тревожность (STAI) по Ч. Спилбергеру, в модификации Ю.Л. Ханина (Карелин, 2007).

Когнитивный тест: обследуемым студентам предлагали выполнить компьютеризованный вариант теста Ф.Д. Горбова (красно-черные таблицы), используемый для оценки концентрации и скорости переключения внимания (Альманах, 1995). Испытуемый располагался в кресле перед экраном монитора, на котором отображалась таблица, состоящая из 24 красных и 25 черных пронумерованных квадратов. Для всех испытуемых использовался одинаковый паттерн расположения квадратов. Испытуемый должен был

указать курсором сначала черные квадраты в порядке возрастания номеров (от 1 до 25), после чего — красные квадраты в порядке убывания номеров (от 24 до 1). Для каждого испытуемого вычисляли время выполнения теста (с) и количество допущенных ошибок.

ЭЭГ регистрировали с помощью электроэнцефалографа “Нейрон-спектр” (г. Иваново) монополярно по схеме “10–20” в затылочных (*O2*, *O1*), теменных (*P4*, *P3*), центральных (*C4*, *C3*), лобных (*F4*, *F3*) и височных (*T4*, *T3*) отведениях. Объединенные референтные электроды располагались на мочках ушей. Полоса фильтрации составляла 0.5–35.0 Гц, постоянная времени — 0.32 с, режективный фильтр — 50 Гц. Частота оцифровки — 200 Гц. После регистрации все записи ЭЭГ были переведены в компьютерную систему анализа и топографического картирования электрической активности мозга “BRAINSYS” для Windows и обработаны с помощью аппаратно-программного комплекса “НЕЙРО-КМ” (ООО “Статокин”, г. Москва) (Митрофанов, 2017). Артефакты исключали из анализируемой записи с использованием возможностей программного комплекса BRAINSYS под визуальным контролем.

Для всех 45 пар отведений (20 внутри- и 25 межполушарных) вычисляли средние значения функции когерентности по тета1-диапазону ЭЭГ, которые рассматривали как коэффициент когерентности, по алгоритмам, используемым в пакете программ “НЕЙРО-КМ” системы BRAINSYS. Для этого запись ЭЭГ длительностью одна минута разбивалась на 15 непересекающихся эпох анализа длительностью 4 секунды каждая. На основе преобразования Фурье и усреднения спектров по эпохам вычисляли оценки взаимной спектральной мощности $S_{ij}(f)$ каналов (*i* и *j*) и оценки спектральной мощности каждого из каналов $S_i(f)$ и $S_j(f)$. Затем вычисляли оценку квадрата модуля когерентности (КМК) $\text{Coh}_{ij}^2(f)$:

$$\text{Coh}_{ij}^2(f) = |S_{ij}(f)|^2 / S_i(f) S_j(f).$$

После чего рассчитывали коэффициент когерентности $\text{Coh}_{ij}(f)$, равный корню квадратному из КМК:

$$\text{Coh}_{ij}(f) = \sqrt{\text{Coh}_{ij}^2(f)}.$$

Для представления и анализа данных использовали методы непараметрической статистики пакета STATISTICA v.10. Данные

представлены в виде медианы и интерквартильного интервала ($M [Q1-Q3]$). В соответствии с рекомендациями по применению статистических методов (Гржибовский, 2016) при сравнении результатов обследования испытуемых независимых групп в каждой из трех ситуаций (Ф1, Ф2, Тест) использовали Kruskal–Wallis ANOVA, апостериорный анализ проводили с помощью Mann–Whitney U test. Изменения показателей в трех ситуациях (Ф1, Ф2, Тест) у одной группы испытуемых оценивали с применением Friedman ANOVA by Ranks, являющегося непараметрическим аналогом дисперсионного анализа повторных измерений. Апостериорные сравнения проводили с использованием Wilcoxon test. Значимость различий, выявленных с помощью апостериорных сравнений (*p*), скорректирована с учетом поправки Бонферрони. Статистически значимыми считали различия при $p < 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

По результатам тестирования выделены группы испытуемых с низкой (ЛТ1, до 30 баллов; 13 человек), средней (ЛТ2, 31–44 балла; 17 человек) и высокой (ЛТ3, 45 и более баллов; 13 человек) личностной тревожностью.

По времени выполнения теста (302 [253–361] с; 279 [244–328] с и 315 [280–344] с в группах ЛТ1, ЛТ2 и ЛТ3 соответственно) и количеству допущенных ошибок (0.69 [0.0–1.0]; 0.61 [0.0–1.0] и 0.33 [0.0–1.0] в группах ЛТ1, ЛТ2 и ЛТ3 соответственно) статистически значимых различий у испытуемых с низкой, средней и высокой ЛТ не обнаружено. При этом несколько меньшие значения времени выполнения теста отмечались у испытуемых со средним уровнем тревожности.

Результаты теста Kruskal–Wallis ANOVA (табл. 1) и апостериорного анализа (Mann–Whitney U test; табл. 2) позволили выявить значимые различия коэффициентов когерентности тета1-диапазона ЭЭГ у испытуемых с низкой, средней и высокой ЛТ на каждом из этапов обследования.

В состоянии относительного покоя при закрытых глазах (Ф1) у испытуемых с высокой ЛТ наблюдалась меньшая, чем у студентов со средней и низкой ЛТ, правополушарная когерентность тета1-диапазона ЭЭГ в системе взаимосвязей с фокусом в правом височном отведении. В исходном состоянии при открытых глазах (Ф2) у испытуемых с высокой лич-

Таблица 1. Сравнение (Kruskal–Wallis ANOVA by Ranks) коэффициентов когерентности тета1-диапазона ЭЭГ у испытуемых с разной личностной тревожностью в состоянии относительного покоя при закрытых глазах (Ф1), в исходном состоянии при открытых глазах (Ф2), а также при выполнении теста (Тест)

Table 1. Comparison (Kruskal–Wallis ANOVA by Ranks) of the coherence coefficients of the teta1 EEG range in subjects with different trait anxiety in the state of relative rest with closed eyes (Ф1), in the initial state with eyes opened (Ф2), as well as when performing the test (Тест)

Отведения ЭЭГ	Ф1		Ф2		Тест	
	Н	<i>p</i>	Н	<i>p</i>	Н	<i>p</i>
C4-O2					9.01	0.011
C3-O1					8.37	0.015
P3-P4					5.99	0.05
F3-P4			8.62	0.014		
T4-P4	6.04	0.049				
C4-P3					8.64	0.013
C3-P3					7.49	0.024
F4-P3					11.24	0.004
C3-C4			9.37	0.009	10.20	0.006
F3-C4			12.95	0.002	9.72	0.008
T4-C4	6.70	0.035				
F4-C3			9.11	0.011	15.50	0.0004
F3-F4			9.39	0.009	12.10	0.002
T4-F4	10.08	0.007			6.13	0.047
T3-T4					8.33	0.016

ностной тревожностью наблюдалась большая, чем у индивидов с низкой и средней ЛТ, межполушарная когерентность в системе взаимосвязей тета1-диапазона ЭЭГ фронтальных, центральных и правого теменного отведений. При выполнении теста (Тест) у испытуемых с высокой ЛТ отмечалась большая, чем у индивидов с низкой ЛТ, межполушарная когерентность тета1-диапазона ЭЭГ фронтальных и центральных областей, а также в системе взаимосвязей с фокусом в левом теменном отведении. У испытуемых со средней ЛТ межполушарная когерентность тета1-диапазона была выше, чем у студентов с низкой ЛТ, в отведениях F4-C3 и F3-F4. Одновременно у испытуемых с низкой ЛТ отмечалась большая, чем у индивидов со средней и высокой ЛТ, внутриполушарная когерентность тета1-диапазона в отведениях C4-O2, C3-O1 и C3-P3.

Сравнение коэффициентов когерентности на последовательных этапах обследования (Ф1 при закрытых глазах — Ф2 при открытых глазах — Тест) с использованием Friedman ANOVA (табл. 3) и апостериорного анализа (Wilcoxon test; табл. 4, 5) выявило особенности динамики когерентности тета1-диапазо-

на ЭЭГ у испытуемых с разной личностной тревожностью (рис. 1).

У испытуемых с низкой ЛТ в состоянии относительного покоя при закрытых (Ф1) и исходном состоянии при открытых (Ф2) глазах значимых отличий когерентности тета1-диапазона не обнаружено. При выполнении теста, по сравнению с исходным состоянием с открытыми глазами (Ф2), наблюдалось достоверное повышение преимущественно внутриполушарной когерентности в 11 парах отведений. В правом полушарии усиливались взаимосвязи с основными фокусами в височном и затылочном отведениях, в левом отмечалось усиление как коротких, так и дистантных взаимосвязей с вовлечением лобного, центрального, теменного и затылочного отведений. Повышалась также межполушарная когерентность в отведениях C3-O2 (табл. 4; рис. 1).

В группе студентов со средней ЛТ в состоянии относительного покоя при закрытых глазах (Ф1) отмечалась более высокая, чем при открытых глазах (Ф2), внутриполушарная когерентность в отведениях T3-O1 ($T = 22$; $Z = 2.77$; $p = 0.018$) и F3-C3 ($T = 19$; $Z = 2.90$; $p = 0.012$). При выполнении теста, по сравнению с исходным состоянием при открытых глазах (Ф2),

Таблица 2. Статистически значимые (Mann–Whitney U test) различия коэффициентов когерентности тета1-диапазона ЭЭГ у испытуемых с низкой (ЛТ1), средней (ЛТ2) и высокой (ЛТ3) личностной тревожностью в состоянии относительного покоя при закрытых глазах (Ф1), в исходном состоянии при открытых глазах (Ф2), а также при выполнении теста (Тест); (Me [Q1; Q3])

Table 2. Statistically significant (Mann–Whitney U test) differences in the coherence coefficients of the teta1-EEG range in subjects with low (ЛТ1), medium (ЛТ2) and high (ЛТ3) trait anxiety in the state of relative rest with closed eyes (Ф1), in the initial state with eyes opened (Ф2), as well as when performing the test (Тест); (Me [Q1; Q3])

Отв. ЭЭГ	ЛТ1	ЛТ2	ЛТ3	ЛТ1-ЛТ2		ЛТ2-ЛТ3		ЛТ1-ЛТ3	
				Z	p	Z	p	Z	p
Ф1 (закрытые глаза)									
T4-P4	0.61 [0.49; 0.68]	0.67 [0.62; 0.76]	0.54 [0.45; 0.64]			2.35	0.057		
T4-C4	0.59 [0.46; 0.74]	0.59 [0.49; 0.74]	0.46 [0.34; 0.54]			2.43	0.045		
T4-F4	0.47 [0.40; 0;63]	0.50 [0.45; 0.67]	0.36 [0.23; 0.39]			2.82	0.015	2.69	0.021
Ф2 (открытые глаза)									
F3-P4	0.39 [0.24; 0.47]	0.42 [0.39; 0.47]	0.51 [0.44; 0.54]			−2.90	0.011		
C3-C4	0.57 [0.52; 0.68]	0.66 [0.59; 0.72]	0.72 [0.69; 0.76]					−2.80	0.015
F3-C4	0.51 [0.49; 0.61]	0.62 [0.46; 0.65]	0.67 [0.64; 0.73]			−3.28	0.003	−2.91	0.011
F4-C3	0.58 [0.54; 0.63]	0.62 [0.53; 0.67]	0.69 [0.66; 0.73]			−2.60	0.027	−2.58	0.029
F3-F4	0.67 [0.64; 0.70]	0.69 [0.65; 0.75]	0.74 [0.72; 0.80]			−2.56	0.030	−2.74	0.018
Тест									
C4-O2	0.74 [0.66; 0.77]	0.62 [0.54; 0.69]	0.60 [0.49; 0.68]	2.50	0.036			2.61	0.027
C3-O1	0.73 [0.65; 0.81]	0.59 [0.56; 0.70]	0.59 [0.52; 0.65]	2.38	0.051			2.61	0.027
P3-P4	0.64 [0.59; 0.68]	0.70 [0.62; 0.73]	0.71 [0.67; 0.76]					−2.38	0.051
C4-P3	0.59 [0.38; 0.68]	0.68 [0.63; 0.73]	0.69 [0.67; 0.71]					−2.90	0.012
C3-P3	0.93 [0.89; 0.95]	0.88 [0.85; 0.91]	0.88 [0.82; 0.89]					2.43	0.045
F4-P3	0.52 [0.32; 0.54]	0.56 [0.51; 0.63]	0.62 [0.57; 0.64]					−3.30	0.003
C3-C4	0.71 [0.61; 0.73]	0.76 [0.69; 0.80]	0.79 [0.75; 0.82]					−3.13	0.005
F3-C4	0.62 [0.55; 0.66]	0.70 [0.63; 0.74]	0.75 [0.67; 0.79]					−3.01	0.008
F4-C3	0.61 [0.58; 0.68]	0.73 [0.66; 0.76]	0.77 [0.71; 0.79]	−2.58	0.03			−3.82	<0.001
F3-F4	0.66 [0.65; 0.75]	0.78 [0.74; 0.81]	0.79 [0.75; 0.85]	−2.38	0.051			−3.30	0.003
T3-T4	0.21 [0.17; 0.35]	0.38 [0.32; 0.48]	0.24 [0.19; 0.34]	−2.34	0.057	2.41	0.048		

Примечание: значения *p* указаны с учетом поправки Бонферрони.

Note: *p* values are given with taking into account the Bonferroni correction.

Таблица 3. Статистически значимые (Friedman ANOVA by Ranks) различия коэффициентов когерентности тета1-диапазона ЭЭГ в состоянии относительного покоя при закрытых глазах ($\Phi 1$), в исходном состоянии при открытых глазах ($\Phi 2$), а также при выполнении теста (Тест) у испытуемых с низкой (ЛТ1), средней (ЛТ2) и высокой (ЛТ3) личностной тревожностью

Table 3. Statistically significant (Friedman ANOVA by Ranks) differences in the coherence coefficients of the teta1 EEG range in the state of relative rest with closed eyes ($\Phi 1$), in the initial state with eyes opened ($\Phi 2$), as well as when performing the test (Тест) in subjects with low (ЛТ1), medium (ЛТ2) and high (ЛТ3) trait anxiety

Отведения ЭЭГ	Friedman ANOVA: $\Phi 1 - \Phi 2 - \text{Тест}$					
	ЛТ1		ЛТ2		ЛТ3	
	χ^2	p	χ^2	p	χ^2	p
O1-O2			10.11	0.006		
P4-O2	12.15	0.002				
C4-O2	19.08	<0.001				
C3-O2	6.62	0.037				
F4-O2	7.39	0.025				
T4-O2	9.69	0.008				
T3-O2			6.33	0.042		
P4-O1			12.00	0.002		
P3-O1	20.46	<0.001				
C3-O1	11.69	0.003				
F3-O1	8.77	0.013				
T4-O1			7.00	0.03		
P3-P4			18.78	<0.001	8.91	0.012
C3-P4			14.33	<0.001		
F3-P4			10.78	0.005		
T4-P4	9.69	0.008	11.11	0.004		
T3-P4			8.78	0.012		
C4-P3			10.11	0.006	7.82	0.020
C3-P3	11.69	0.003				
F4-P3			12.0	0.003	8.91	0.012
F3-P3	7.39	0.025				
T4-P3			12.11	0.002		
T3-P3			10.11	0.006		
C3-C4			12.0	0.003	7.82	0.020
F4-C4			12.33	0.002		
F3-C4			11.44	0.003		
T4-C4	9.39	0.009				
T3-C4			10.78	0.005		
F4-C3			12.11	0.002		
F3-C3	12.92	0.002	8.78	0.012		
T4-C3			16.44	<0.001		
F3-F4			7.0	0.03		
T4-F4	11.23	0.004				
T4-F3			8.44	0.015		
T3-T4			12.44	0.002		

Таблица 4. Различия (Wilcoxon Test) коэффициентов когерентности тета1-диапазона ЭЭГ у испытуемых с низкой и высокой личностной тревожностью в состоянии относительного покоя при закрытых глазах (Φ1), в исходном состоянии при открытых глазах (Φ2), а также при выполнении теста (Тест); (Me [Q1; Q3])

Table 4. Differences (Wilcoxon Test) in the coherence coefficients of the teta1 EEG range in subjects with low and high trait anxiety in the state of relative rest with closed eyes (Φ1), in the initial state with eyes opened (Φ2), as well as when performing the test (Тест); (Me [Q1; Q3])

Отведения ЭЭГ	Φ1	Φ2	Тест	Wilcoxon Test Φ2 -Тест	
				Z	p
ЛТ1					
P4-O2	0.85 [0.79; 0.88]	0.86 [0.79; 0.89]	0.89 [0.83; 0.89]	3.04	0.006
C4-O2	0.62 [0.53; 0.71]	0.65 [0.54; 0.74]	0.74 [0.66; 0.77]	2.97	0.009
C3-O2	0.34 [0.17; 0.42]	0.29 [0.18; 0.34]	0.42 [0.25; 0.47]	2.83	0.014
F4-O2	0.42 [0.26; 0.56]	0.43 [0.39; 0.51]	0.55 [0.48; 0.59]	2.69	0.021
T4-O2	0.51 [0.43; 0.57]	0.56 [0.41; 0.59]	0.66 [0.46; 0.69]	3.30	0.011
P3-O1	0.82 [0.76; 0.85]	0.84 [0.73; 0.87]	0.87 [0.79; 0.91]	3.18	0.005
C3-O1	0.63 [0.57; 0.69]	0.68 [0.51; 0.73]	0.73 [0.65; 0.81]	3.11	0.006
F3-O1	0.45 [0.33; 0.57]	0.45 [0.29; 0.60]	0.56 [0.47; 0.59]	2.55	0.033
T4-P4	0.61 [0.49; 0.68]	0.59 [0.49; 0.66]	0.72 [0.55; 0.76]	2.41	0.048
C3-P3	0.89 [0.85; 0.92]	0.90 [0.83; 0.94]	0.93 [0.89; 0.95]	2.41	0.048
F3-P3	0.71 [0.55; 0.79]	0.68 [0.55; 0.78]	0.78 [0.71; 0.79]	2.48	0.04
T4-C4	0.59 [0.46; 0.74]	0.55 [0.47; 0.66]	0.69 [0.57; 0.79]	3.18	0.005
F3-C3	0.86 [0.85; 0.93]	0.87 [0.84; 0.89]	0.89 [0.87; 0.91]	3.18	0.005
T4-F4	0.47 [0.40; 0.63]	0.45 [0.38; 0.60]	0.62 [0.48; 0.71]	2.76	0.02
ЛТ3					
P3-P4	0.65 [0.61; 0.73]	0.65 [0.59; 0.68]	0.71 [0.67; 0.76]	2.76	0.018
C4-P3	0.63 [0.62; 0.72]	0.64 [0.61; 0.66]	0.69 [0.67; 0.71]	2.85	0.012
F4-P3	0.51 [0.44; 0.57]	0.54 [0.49; 0.55]	0.62 [0.57; 0.64]	2.67	0.023
C3-C4	0.77 [0.69; 0.80]	0.72 [0.69; 0.76]	0.79 [0.75; 0.82]	2.49	0.04

Примечание: значения *p* указаны с учетом поправки Бонферрони.

Note: *p* values are given with taking into account the Bonferroni correction.

наблюдалось усиление межполушарных взаимосвязей как между гомологичными, так и не-гомологичными дистантно расположенными областями коры (в 19 парах отведений), а также повышение внутриполушарной когерентности фронтальных и центральных областей коры обоих полушарий (табл. 5; рис. 1).

У индивидов с высокой ЛТ значимых различий уровня когерентности в состоянии относительного покоя при закрытых (Φ1) и исходном состоянии при открытых (Φ2) глазах не обнаружено. При выполнении теста по сравнению с предшествующим этапом (Φ2 при открытых глазах) наблюдалось достоверное повышение межполушарной когерентности в системе взаимосвязей с фокусом в отведении P3, а также в отведениях C3-C4 (табл. 4; рис. 1).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенное исследование показало, что у испытуемых с разной ЛТ не отмечалось значимых различий в количестве допущенных ошибок и общем времени выполнения теста на внимание. И, хотя традиционно высокая эффективность когнитивной деятельности ассоциируется со средним (оптимальным) уровнем тревожности (Хекхаузен, 2003), показано, что испытуемые с разной ЛТ могут достигать одинаковых результатов при выполнении когнитивных тестов (Венерина и др., 2021). При этом достижение высоких результатов при решении поведенческих и когнитивных задач у высокотренированных индивидов связано с усилением контроля над вниманием (Eysenck et al., 2007).

Выявлены различия когерентности тета1-ритма у испытуемых с разной личностной

Таблица 5. Различия (Wilcoxon Test) коэффициентов когерентности тета1-диапазона ЭЭГ у испытуемых со средней личностной тревожностью в состоянии относительного покоя при закрытых глазах (Ф1), в исходном состоянии при открытых глазах (Ф2), а также при выполнении теста (Тест); (Me [Q1; Q3])

Table 5. Differences (Wilcoxon Test) in the coherence coefficients of theta1 range of EEG in subjects with medium level of trait anxiety in the state of relative rest with closed eyes (Ф1), in the initial state with eyes opened (Ф2), as well as when performing the test (Тест); (Me [Q1; Q3])

Отведения ЭЭГ	Ф1	Ф2	Тест	Wilcoxon Test Ф2 -Тест	
				Z	p
O1-O2	0.51 [0.45; 0.66]	0.49 [0.38; 0.64]	0.62 [0.53; 0.70]	3.16	0.005
T3-O2	0.28 [0.25; 0.43]	0.28 [0.18; 0.35]	0.37 [0.27; 0.42]	2.98	0.009
P4-O1	0.49 [0.42; 0.59]	0.51 [0.43; 0.56]	0.61 [0.46; 0.66]	3.29	0.003
T4-O1	0.32 [0.18; 0.30]	0.29 [0.21; 0.36]	0.39 [0.31; 0.48]	2.64	0.025
P3-P4	0.61 [0.50; 0.71]	0.61 [0.55; 0.66]	0.70 [0.62; 0.73]	3.68	0.001
C3-P4	0.56 [0.49; 0.66]	0.58 [0.51; 0.61]	0.64 [0.59; 0.74]	3.38	0.002
F3-P4	0.48 [0.32; 0.55]	0.42 [0.39; 0.47]	0.53 [0.42; 0.61]	3.07	0.006
T3-P4	0.32 [0.27; 0.51]	0.34 [0.24; 0.40]	0.42 [0.34; 0.50]	3.20	0.004
C4-P3	0.62 [0.51; 0.66]	0.59 [0.55; 0.67]	0.68 [0.63; 0.73]	3.25	0.004
F4-P3	0.49 [0.42; 0.58]	0.51 [0.43; 0.55]	0.56 [0.51; 0.63]	2.94	0.012
T4-P3	0.35 [0.22; 0.44]	0.34 [0.22; 0.43]	0.47 [0.37; 0.51]	3.38	0.002
C3-C4	0.68 [0.60; 0.77]	0.66 [0.59; 0.72]	0.76 [0.69; 0.80]	3.46	0.002
F4-C4	0.89 [0.84; 0.92]	0.85 [0.82; 0.93]	0.89 [0.87; 0.92]	2.85	0.012
F3-C4	0.64 [0.59; 0.71]	0.62 [0.46; 0.65]	0.70 [0.63; 0.74]	3.25	0.004
T3-C4	0.33 [0.25; 0.49]	0.33 [0.25; 0.48]	0.45 [0.35; 0.50]	2.72	0.019
F4-C3	0.65 [0.51; 0.71]	0.62 [0.53; 0.67]	0.73 [0.66; 0.76]	2.81	0.015
F3-C3	0.89 [0.86; 0.90]	0.86 [0.85; 0.89]	0.88 [0.85; 0.92]	2.90	0.011
T4-C3	0.28 [0.21; 0.40]	0.32 [0.20; 0.42]	0.48 [0.35; 0.51]	2.94	0.009
F3-F4	0.71 [0.66; 0.80]	0.69 [0.65; 0.75]	0.78 [0.74; 0.81]	2.50	0.036
T4-F3	0.28 [0.17; 0.37]	0.25 [0.16; 0.32]	0.38 [0.23; 0.44]	2.50	0.036
T3-T4	0.25 [0.21; 0.31]	0.25 [0.16; 0.38]	0.38 [0.32; 0.48]	3.11	0.006

Примечание: значения *p* указаны с учетом поправки Бонферрони.

Note: *p* values are given taking into account the Bonferroni correction.

тревожностью в анализировавшихся экспериментальных ситуациях (состояние относительного покоя при закрытых глазах, исходное состояние при открытых глазах и во время выполнения теста).

В состоянии относительного покоя при закрытых глазах (Ф1) у индивидов с высокой тревожностью наблюдалась меньшая когерентность тета1-диапазона ЭЭГ правых передних областей коры. Этот факт находит некоторые подтверждения в литературе. Как уже упоминалось выше, в исходном состоянии у высокотревожных испытуемых отмечался низкий уровень внутриполушарной функциональной кооперации на частоте тета-ритма между медиальной префронтальной, правой задней цингулярной и ретро-спленальной корой (Imperatori et al., 2019;

Schoenberg, 2020). Приводятся сведения о снижении билатеральных внутриполушарных взаимодействий по тета-диапазону в височных отделах коры при высокой личностной тревожности (Hanaoka et al., 2005). Ранее нами было показано, что в состоянии относительного покоя при закрытых глазах у испытуемых с высокой тревожностью наблюдалась меньшая, чем при выполнении теста, а также в ряде отведений меньшая, чем у испытуемых со средней и высокой личностной тревожностью, мощность тета1-потенциалов ЭЭГ (Джебраилова и др., 2021). С одной стороны, ситуация регистрации ЭЭГ при закрытых глазах характеризуется снижением уровня активации коры, которое у большинства людей проявляется прежде всего в синхронизации альфа-ритма в результате снижения

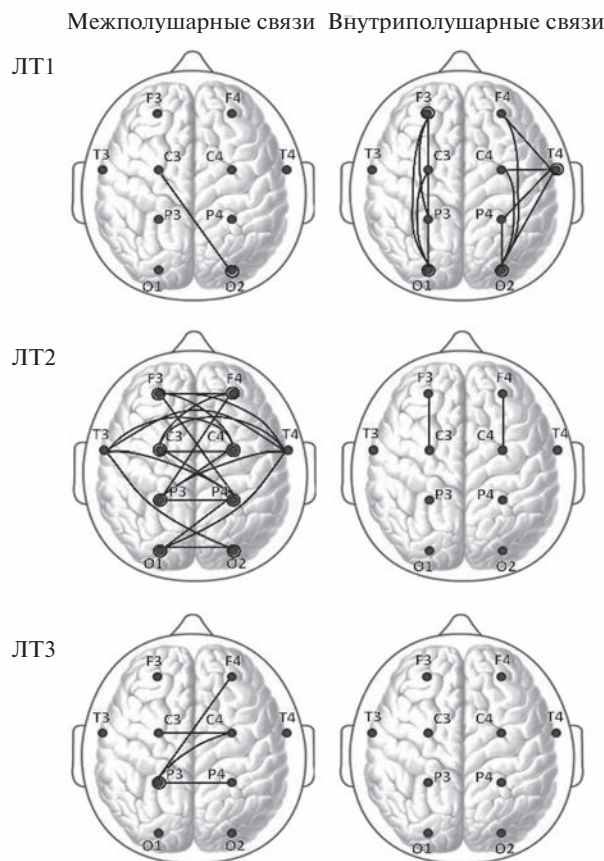


Рис. 1. Усиление меж- и внутрислошарных когерентных взаимосвязей тета1-диапазона ЭЭГ при выполнении теста на внимание по сравнению с исходным состоянием при открытых глазах (Ф2) у испытуемых с низкой (ЛТ1), средней (ЛТ2) и высокой (ЛТ3) личностной тревожностью. **Примечание:** представлены только достоверные изменения ($p < 0.05$).

Fig. 1. Increase of inter- and intrahemispheric coherent interrelations of the teta1-range of EEG during performing the attention test compared to the initial state with eyes opened (Ф2) in subjects with low (ЛТ1), medium (ЛТ2) and high (ЛТ3) trait anxiety. **Note:** only significant changes ($p < 0.05$) are mentioned.

уровня активирующих влияний со стороны ретикуло-таламической модулирующей системы в условиях существенного ограничения сенсорной афферентации. С другой стороны, эту экспериментальную ситуацию в нашем исследовании нельзя считать полностью соответствующей состоянию полного покоя. Ситуация после предварительного ознакомления с организацией обследования, но до конкретной инструкции по выполнению теста, может быть охарактеризована как недостаточно определенная в информацион-

ном аспекте. Неопределенность ранее полученной информации является одной из детерминант, стимулирующих ориентировочно-исследовательскую деятельность с целью получения недостающих уточняющих сведений и снижения неопределенности (Данилова, 2022). Учитывая, что увеличение мощности тета-ритма в передних отделах коры рассматривают как проявление функций “селективно распределенной интегративной тета-системы”, связанных с усилением ориентировочной реакции и концентрацией внимания (Basar et al., 2001), меньшая мощность и когерентность потенциалов тета1-диапазона ЭЭГ, особенно в правых передних областях коры, может отражать характерное для высокотренированных индивидов преобладание оборонительной формы поведения, тормозящей ориентировочно-исследовательскую деятельность.

В исходном состоянии при открытых глазах (Ф2) межполушарная когерентность в лобных и центральных, а также правой теменной областях коры у испытуемых с высокой ЛТ была выше, чем у испытуемых с низкой и средней ЛТ, и может быть связана с характерным для высокотренированных индивидов усилением непроизвольного внимания к внешним потенциально опасным стимулам, связанным в данном случае с обстановкой и процедурой обследования, включающей регистрацию ЭЭГ и необходимость выполнения компьютерного когнитивного теста.

Повышение межполушарной когерентности, наблюдавшееся у испытуемых со средней ЛТ, приводило к тому, что во время выполнения теста различия в уровне межполушарной когерентности тета1-диапазона ЭЭГ у испытуемых с высокой и средней ЛТ не отмечалось. При этом различия в уровне межполушарной когерентности по тета1-диапазону между испытуемыми с высокой и низкой ЛТ не только сохранялись, но и увеличивались за счет усиления взаимосвязей с фокусом в левой теменной области, наблюдавшегося у индивидов с высокой тревожностью. Большая межполушарная когерентность потенциалов тета1-диапазона ЭЭГ, характерная для индивидов с высокой личностной тревожностью при выполнении теста (по сравнению с низкотренированными индивидами), может быть связана, во-первых, с привлечением ресурсов внимания к потенциально угрожающим стимулам, связанным с процедурой обследования. А во-вторых, отражать тот факт, что для успешного решения поведенческих задач

испытуемые с высокой тревожностью вынуждены затрачивать больше усилий, в частности, по контролю внимания, чем низкотревожные (Eysenck et al., 2007). Основанием для такой интерпретации является вовлеченность в систему более высоких когерентных взаимосвязей фронтальных и париетальных областей и тот факт, что именно фронто-париетальную систему рассматривают как компонент нисходящей системы контроля внимания (Petersen, Posner, 2012).

Наиболее существенные различия между группами испытуемых с разной личностной тревожностью при достижении формально одинакового результата теста на внимание проявлялись в динамике когерентности тета1-диапазона ЭЭГ на этапах обследования.

У испытуемых с низкой ЛТ во время тестирования по сравнению с предшествующим этапом (Ф2) отмечалось повышение главным образом внутриполушарной когерентности потенциалов тета1-диапазона ЭЭГ. Анализ внутриполушарной когерентности ЭЭГ в пространстве источников (Мачинская и др., 2016) позволил выделить по крайней мере два типа функциональных связей, которые объединяли корковые зоны на основе синхронизации их активности в тета-диапазоне ЭЭГ. Связи первого типа, объединяющие дорзальную часть передней цингулярной коры — часть лимбической системы мотивационной регуляции — с префронтальными и височными зонами правого полушария, отражают активацию нейрофизиологических механизмов, обеспечивающих тоническое поддержание неспецифического внимания (мотивационный компонент рабочей памяти). Связи второго типа объединяли корковые зоны, расположенные в теменной, височной и префронтальной коре на латеральной поверхности обоих полушарий, а в левом полушарии включали также заднюю цингулярную и медиальную теменную кору. Авторы полагают, что связи этого типа отражают функциональную интеграцию гиппокампа и неокортекса при увеличении нагрузки на процессы памяти (мнестический компонент рабочей памяти). Очевидно, что оба эти компонента играют существенную роль при выполнении теста Горбова. В другом исследовании выявлена дорсальная правосторонняя фронто-теменная сеть, активность которой отражает смещение внимания в пространстве и чувствительность к поведенческой значимости стимулов (Fellrath et al., 2016). Авторы отмечают, что фронто-те-

менная функциональная связь в тета-диапазоне нарушена у пациентов с дефицитом пространственного внимания.

Наибольшая лабильность структуры когерентных взаимосвязей в тета1-диапазоне ЭЭГ наблюдалась у испытуемых со средним уровнем личностной тревожности. При переходе от состояния относительного покоя с закрытыми глазами (Ф1) к исходному состоянию с открытыми глазами (Ф2) отмечалось снижение внутриполушарной когерентности, достигавшее достоверного уровня билатерально в лобных и затылочных областях, а также в левых лобной и центральной областях коры. При тестировании, по сравнению с предшествующим этапом (Ф2), наблюдалось достоверное повышение как внутриполушарной, так и межполушарной когерентности большинства областей коры.

Ранее было показано, что одним из факторов, способствующих достижению высокого результата разных видов когнитивной деятельности, является лабильность межцентральных отношений, проявляющаяся в изменении паттерна когерентных взаимосвязей основных диапазонов ЭЭГ (Судаков и др., 2013; Джебраилова и др., 2018). Однако в этих исследованиях не анализировалась роль личностной тревожности. Можно предположить, что высокая лабильность межцентральных взаимоотношений является одним из факторов, способствующих достижению высокого результата у индивидов со средней тревожностью при деятельности в осложненных ситуациях, требующих перераспределения когнитивных ресурсов. Однако это предположение требует проведения специальных исследований.

В целом роль межполушарной интеграции в обеспечении когнитивных функций хорошо известна. От качества межполушарного взаимодействия зависит уровень интеллекта (Ковязина, Балашова, 2009), снижение межполушарной когерентности коррелирует с ухудшением показателей когнитивных функций (Francis et al., 2011), межполушарное взаимодействие усиливается при повышении трудности выполняемого задания (Игнатова и др., 2016).

Объединение корковых зон, расположенных в теменной, височной и префронтальной коре на латеральной поверхности обоих полушарий, соответствует формированию мнестического компонента рабочей памяти (Ма-

чинская и др., 2016). Повышение межполушарной когерентности между фронтальными и париетальными областями может свидетельствовать об активации фронто-париетальной сети нисходящего контроля внимания (Petersen, Posner, 2012) и, в целом, отражать усиление роли системы произвольного контроля, ключевыми структурами которой являются различные зоны префронтальной и теменной коры, связанные с субкортикальными структурами в единую сеть (Мачинская, 2019).

Минимальные изменения структуры когерентных взаимосвязей во время тестирования по сравнению с предшествующим этапом (Ф2) наблюдались у индивидов с высокой ЛТ, у которых отмечалось значимое повышение межполушарной когерентности с основным фокусом в левом теменном отведении, а также между центральными областями. Инертность структуры когерентных взаимосвязей, отражающая низкую лабильность межцентральных взаимоотношений, может способствовать формированию застойных стационарных состояний и лежать в основе снижения адаптационных возможностей и результативности когнитивной деятельности у индивидов с высокой тревожностью в усложненных, прежде всего стрессорных ситуациях.

Помимо различий в изменении структуры когерентных взаимосвязей тета1-диапазона при выполнении теста по сравнению с предшествующим этапом (Ф2), у испытуемых с разной личностной тревожностью были обнаружены и некоторые сходные черты, в частности, усиление когерентности с вовлечением центральных отведений ЭЭГ. Вовлечение в распределенную нейронную сеть центральных областей коры может быть связано со специфической формой требуемого при выполнении теста ответа – моторной реакцией, заключающейся в нажатии на кнопку компьютерной “мыши”. Повышение когерентности потенциалов тета1-диапазона в системе внутри- и межполушарных взаимосвязей с участием центральных областей коры в этой ситуации отражает, вероятно, активацию моторного внимания как селективной установки, действующей на уровне выходных сигналов. Моторное внимание необходимо как для запуска моторной программы, так и для функционирования обратной связи о результатах движения и контроля точности выполнения моторной программы (Данилова,

1999). Следует отметить, что спектральная мощность тета1-диапазона ЭЭГ в центральных отведениях при выполнении теста, по сравнению с исходным состоянием с открытыми глазами, также увеличивалась у испытуемых всех трех групп (Джебраилова и др., 2021). Традиционно с организацией моторных реакций связывают десинхронизацию мю-ритма ЭЭГ в центральных областях (Pineda, 2005). Однако в литературе приводятся сведения о роли тета-ритма ЭЭГ, зарегистрированной в сенсомоторной области коры в двигательной активности, в частности, при разгибании пальцев правой руки (Ketenci S., Kayikcioglu T., 2019). Для решения вопроса о том, связано наблюдавшееся нами увеличение мощности и когерентности тета1-ритма в центральных областях коры с моторным вниманием или с собственно организацией движений, очевидно, необходимо самостоятельное исследование.

Включение в систему межполушарных взаимосвязей, усиливающихся при выполнении теста по сравнению с исходным состоянием, затылочных (зрительных) областей коры, наблюдавшееся у испытуемых с низкой и средней ЛТ, очевидно, связано с сенсорной модальностью выполняемого задания. Одновременно при выполнении теста отмечалось увеличение мощности тета1-ритма ЭЭГ затылочных областей коры (Джебраилова и др., 2021). Эти данные в определенной степени можно соотнести с результатами исследования, в котором показано, что в период кратковременного удержания следа в рабочей памяти растет мощность и локальная когерентность тета-осцилляций в височных, теменных и затылочных зонах коры, а также в гиппокампе (Sauseng et al., 2007).

Интересные данные о роли активности тета-диапазона в сети внимания в координации моторных и сенсорных функций приводятся в работе (Fiebelkorn, Kastner, 2019). Фронтотеменная часть сети внимания расположена на стыке сенсорных и моторных функций и путем периодического изменения веса функциональных связей между областями мозга высшего порядка и сенсорными или моторными областями способствует осуществлению либо сенсорных, либо моторных функций.

Когнитивная деятельность обеспечивается распределенными нейронными сетями, которые являются динамическими образованиями, т.е. они формируются в процессе под-

готовки к деятельности и разрушаются по ее окончании (Bressler, Menon, 2010). Динамическая организация распределенных нейронных сетей в процессе деятельности определяется не только целями и характером самой деятельности, но также и более жесткими видовыми и возрастными особенностями связей между различными структурами мозга (Bressler, Tognoli, 2006; Мачинская, 2019). Специфика динамики когерентности тета1-диапазона ЭЭГ, отражающая особенности формирования нейронной сети, обеспечивающей выполнение когнитивного теста индивидами с разной тревожностью при достижении ими одинаковых результатов, позволяет говорить о том, что в организацию распределенных нейронных сетей определенным вклад вносит и личностная тревожность. Модулирующая роль тревожности может быть связана с разной степенью вовлечения в осуществляемую деятельность структур, являющихся компонентами системы внимания, в частности системы контроля, а также процессов внутри- и межполушарной интеграции.

ВЫВОДЫ

1. Впервые выявлены особенности структуры когерентных взаимосвязей тета1-диапазона ЭЭГ в состоянии относительного покоя и ее изменения при тестирования внимания, характерные для испытуемых с разной тревожностью, свидетельствующие о том, что личностная тревожность является одним из факторов, модулирующих организацию нейрокогнитивных сетей.

2. Наблюдавшаяся у испытуемых с высокой тревожностью в исходном состоянии при закрытых глазах меньшая, чем у испытуемых с низкой и средней тревожностью, правополушарная когерентность тета1-диапазона ЭЭГ передних областей коры может отражать характерное для этих индивидов преобладание оборонительной формы поведения, тормозящей ориентировочно-исследовательскую деятельность.

3. Большая межполушарная когерентность потенциалов тета1-диапазона ЭЭГ лобных, центральных и теменных областей коры, характерная для индивидов с высокой личностной тревожностью как в исходном состоянии при открытых глазах (по сравнению с испытуемыми со средней и низкой тревожностью), так и при выполнении теста (по срав-

нению с низкотревожными индивидами), связана с привлечением ресурсов внимания к потенциально угрожающим стимулам и усилением контроля произвольного внимания при выполнении теста.

4. Впервые показано, что наибольшая лабильность структуры когерентных взаимосвязей в тета1-диапазоне ЭЭГ при когнитивной деятельности характерна для испытуемых со средней личностной тревожностью, у которых наблюдалось повышение как внутри- (между лобными и центральными областями), так и межполушарной когерентности большинства областей коры при выполнении теста по сравнению с исходным состоянием.

5. Для индивидов с высокой тревожностью была характерна относительная инертность структуры когерентных взаимосвязей в тета1-диапазоне ЭЭГ на этапах когнитивной деятельности. Во время тестирования внимания по сравнению с предшествующим этапом у индивидов с высокой личностной тревожностью отмечалось повышение межполушарной когерентности с основным фокусом в левой теменной области, а также между центральными областями коры.

6. У испытуемых с низкой личностной тревожностью наблюдалось увеличение преимущественно внутримушарной когерентности тета1-диапазона ЭЭГ большинства областей коры при выполнении теста по сравнению с исходным состоянием.

ЭТИЧЕСКИЕ НОРМЫ

Все исследования проведены в соответствии с принципами биомедицинской этики, сформулированными в Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующих обновлениях, и одобрены локальным биоэтическим комитетом ФГБНУ «Научно-исследовательский институт нормальной физиологии им. П.К. Анохина».

Информированное согласие. Каждый участник исследования предоставил добровольное письменное информированное согласие, подписанное им после разъяснения ему потенциальных рисков и преимуществ, а также характера предстоящего исследования.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование не имело спонсорской поддержки.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией данной статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Афтанас Л.И., Брак И.В., Рева Н.В., Павлов С.В. Осцилляторные системы мозга и индивидуальная вариабельность оборонительного рефлекса сердца у человека. Российский физиологический журн. им. И.М. Сеченова. 2013. 99 (11): 1342–1356.
- Базанова О.М., Кондратенко А.В., Кузьмина О.И., Муравлева К.Б., Петрова С.Э. Эффективность когнитивной деятельности и психоэмоциональное напряжение в разные фазы менструального цикла. Российский физиологический журн. им. И.М. Сеченова. 2013. 99 (7): 820–829.
- Венерина Я.А., Джебраилова Т.Д., Каратыгин Н.А., Будников М.Ю. Спектральные характеристики ЭЭГ и концентрация гормонов в слюне у лиц с разной личностной тревожностью при когнитивной деятельности. Психическое здоровье. 2021. 8: 3–12.
- Грибанов А.В., Кожеевникова И.С., Джос Ю.С., Нехорошикова А.Н. Спонтанная и вызванная электрическая активность головного мозга при высоком уровне тревожности. Экология человека. 2013. 1: 39–47.
- Гржибовский А.М., Иванов С.В., Горбатова М.А. Сравнение количественных данных трех и более независимых выборок с использованием программного обеспечения Statistica и SPSS: параметрические и непараметрические критерии. Наука и здравоохранение. 2016. 4: 5.
- Гржибовский А.М., Иванов С.В., Горбатова М.А. Сравнение количественных данных трех и более парных выборок с использованием программного обеспечения Statistica и SPSS: параметрические и непараметрические критерии. Наука и здравоохранение. 2016. 5: 5.
- Данилова Н.Н. Психофизиология. М.: Аспект-Пресс. 1999. С. 55–93.
- Данилова Н.Н. Ориентировочно-исследовательская деятельность. Психофизиология под ред. Ю.И. Александрова. СПб.: Питер. 2022. С. 214–223.
- Джебраилова Т.Д., Коробейникова И.И., Каратыгин Н.А., Бирюкова Е.В., Венерина Я.А. Динамика спектральных характеристик ЭЭГ у лиц с разной личностной тревожностью при когнитивной деятельности. Физиология человека. 2021. 47 (1): 20–30.
- Джебраилова Т.Д., Коробейникова И.И., Каратыгин Н.А., Дудник Е.Н. Спектрально-когерентные характеристики тета-1 и тета-2 активности ЭЭГ при когнитивной деятельности человека. Журн. высш. нерв. деят. им. И.П. Павлова. 2018. 68 (3): 327–339.
- Иванова Г.П., Горобец Л.Н., Литвинов А.В., Буланов В.С., Василенко Л.М. Роль прогестерона и его метаболитов в регуляции функций головного мозга. Журн. неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. 2018. (5): 129–137.
- Игнатова Ю.П., Макарова И.И., Зенина О.Ю., Аксенова А.В. Современные аспекты изучения функциональной межполушарной симметрии мозга (обзор литературы). Экология человека. 2016. (9): 30–39.
- Карелин А.А. Большая энциклопедия психологических тестов. М.: Эксмо. 2007. 416 с.
- Ковязина М.С., Балашова Е.Ю. Межполушарное взаимодействие при нормальном и отклоняющемся развитии: мозговые механизмы и психологические особенности. Руководство по функциональной межполушарной асимметрии. М.: Научный мир, 2009. Гл. 7: 185–206.
- Мачинская Р.И., Розовская Р.И., Курганский А.В., Печенкова Е.В. Корово-коровое функциональное взаимодействие при удержании эмоционально окрашенных изображений в рабочей памяти. Анализ когерентности тета-ритма ЭЭГ в пространстве источников. Физиология человека. 2016. 42 (3): 56–73.
- Мачинская Р.И., Курганский А.В., Ломакин Д.И. Возрастные изменения функциональной организации корковых звеньев регуляторных систем мозга у подростков. Анализ нейронных сетей покоя в пространстве источников ЭЭГ. Физиология человека. 2019. 45 (5): 5–19.
- Методика Горбова “Красно-черная таблица”. Альманах психологических тестов. М., 1995. С. 117–118.
- Митрофанов А.А. Компьютерная система анализа и топографического картирования электрической активности мозга с нейрометрическим банком ЭЭГ-данных “Brainsys”. Описание применения. Руководство системного оператора. Руководство системного программиста. М.: Научно-медицинская фирма “Статокин”, 2017. 165 с.
- Мысин И.Е. Функции гиппокампального тета-ритма. Журн. высш. нерв. деят. 2020. 70 (3): 314–325.
- Ребрейкина А.Б., Ларионова Е.В., Варламов А.А. Вызванные изменения ритмической активности мозга при переработке зрительно предъявляемых целевых, нецелевых и незнакомых. Журн. высш. нерв. деят. им. И.П. Павлова. 2015. 65 (1): 92–104.
- Судаков К.В., Джебраилова Т.Д., Коробейникова И.И., Каратыгин Н.А. Геометрические образы когерентных взаимоотношений биопотенциалов различных частотных диапазонов ЭЭГ в динамике целенаправленной деятельности человека. Российский физиологический журн. им. И.М. Сеченова. 2013. 99 (6): 706–718.
- Хекхаузен Х. Мотивация и деятельность. 2-е изд. СПб.: Питер; М.: Смысл, 2003. 859 с.

- Al-Ezzi A., Kamel N., Faye I., Gunaseli E.* Review of EEG, ERP, and Brain Connectivity Estimators as Predictive Biomarkers of Social Anxiety Disorder. *Front Psychol.* 2020. 11: 730.
- Angst J., Sellaro R., Merikangas K.R., Endicott J.* The epidemiology of perimenstrual psychological symptoms. *Acta Psychiatr Scand.* 2001. 104: 110–116.
- Basar E., Schurmann M., Sakowitz O.* The selectively distributed theta system: functions. *Int. J. Psychophysiol.* 2001. 39 (2): 197–212.
- Bressler S.L., Menon V.* Large-scale brain networks in cognition: emerging methods and principles. *Trends. Cogn. Sci.* 2010. 14 (6): 277–290.
- Bressler S.L., Tognoli E.* Operational principles of neurocognitive networks. *Int. J. Psychophysiol.* 2006. 60(2): 139–148.
- Clayton M.S., Yeung N., Kadosh R.C.* The roles of cortical oscillations in sustained attention. *Trends in cognitive sciences*, 2015. 19 (4): 188–195.
- Eysenck M.W., Derakshan N., Santos R., Calvo M.G.* Anxiety and cognitive performance: attentional control theory. *Emotion.* 2007. 7(2): 336–356.
- Fellrath J., Mottaz A., Schnider A., Guggisberg A.G. and Ptak R.* Theta-band functional connectivity in the dorsal fronto-parietal network predicts goal-directed attention. *Neuropsychologia*, 92. 2016. P. 20–30.
- Fiebelkorn I.C., Kastner S.* A rhythmic theory of attention. *Trends in cognitive sciences*. 2019. 23 (2): 87–101.
- Francis A.N., Bhojraj T.S., Prasad K.M., Kulkarni S., Montrose D.M., Eack S.M., Keshavan M.S.* Abnormalities of the corpus callosum in non-psychotic high-risk offspring of schizophrenia patients. *Psychiatry Res.* 2011. 191 (1): 9–15.
- Jaiswal S., Tsai S., Juan C., Muggleton N.G., Liang W.* Low delta and high alpha power are associated with better conflict control and working memory in high mindfulness, low anxiety individuals. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*. 2019. 14 (6): 645–655.
- Hanaoka A., Kikuchi M., Komuro R.* EEG coherence analysis in never-medicated patients with panic disorder. *Clin. EEG Neurosci.* 2005. 36 (1): 42–48.
- Helfrich R.F., Fiebelkorn I.C., Szczepanski S.M., Lin J.J., Parvizi J., Knight R.T., Kastner S.* Neural mechanisms of sustained attention are rhythmic. *Neuron.* 2018. 99: 854–865.
- Imperatori C., Farina B., Adenzato M., Valenti E.M., Murgia C., Marca G.D., Brunetti R., Fontana E., Ardito R.B.* Default mode network alterations in individuals with high-trait-anxiety: An EEG functional connectivity study. *J. Affect Disord.* 2019. 246 (1): 611–618.
- Ketenci S., Kayikcioglu T.* Investigation of theta rhythm effect in detection of finger movement. *J. Experimental Neuroscience.* 2019. 13. 1179069519828737.
- Klimesch W.* EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: a review and analysis. *Brain Res. Rev.* 1999. 29: 169–195.
- Pessoa L.* Understanding emotion with brain networks. *Curr. Opin. Behav. Sci.* 2018. 19: 19–25.
- Petersen S.E., Posner M.I.* The attention system of the human brain: 20 years after. *Annual review of neuroscience.* 2012. 35: 73–89.
- Pineda J.* The functional significance of mu rhythms: translating “seeing” and “hearing” into “doing”. *Brain Res. Rev.* 2005. 50: 57–68.
- Saunders A., Kirk I.J., Waldie K.E.* Hemispheric Coherence in ASD with and without Comorbid ADHD and Anxiety. *Biomed Res Int.* 2016. (vol.2016 Article ID 4267842, 12 pages).
- Sauseng P., Hoppe J., Klimesch W., Gerloff C., Hummel F.C.* Dissociation of sustained attention from central executive functions: local activity and interregional connectivity in the theta range. *Eur. J. Neurosci.* 2007. 25 (2): 587.
- Sauseng P., Klimesch W., Heise K.F., Gruber W.R., Holz E., Karim A.A., Glennon M., Gerloff C., Birbaumer N., Hummel F.C.* Brain oscillatory substrates of visual short-term memory capacity. *Current Biol.* 2009. 19 (21): 1846–1852.
- Schoenberg P.L.A.* Linear and Nonlinear EEG-Based Functional Networks in Anxiety Disorders. *Adv. Exp. Med. Biol.* 2020. 1191: 35–59.
- Sperl M.F., Panitz C., Rosso I.M., Dillon D.G., Kumar P., Hermann A., Whitton A.E., Hermann C., Pizzagalli D.A., Mueller E.M.* Fear extinction recall modulates human frontomedial theta and amygdala activity. *Cerebral cortex.* 2019. 29 (2): 701–715.
- Spielberger C.D., Ritterband L.M., Sydeman S.J., Reheiser, E.C., Unger, K.K.* Assessment of emotional states and personality traits: measuring psychological vital signs. *Clinical Personality Assessment: Practical Approaches.* Ed. Butcher J.N. N.Y.: Oxford University Press, 1995. 42: 59.
- VanRullen R.* Attention Cycles. *Neuron.* 2018. 99 (4): 632–634.
- Womelsdorf T., Johnston K., Vinck M., Everling S.* Theta-activity in anterior cingulate cortex predicts task rules and their adjustments following errors. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 2010. 107 (11): 5248–5253.
- Xing M., Tadayonnejad R., MacNamara A., Ajilore O., DiGangi J., Phan K.L., Leow A., Klumpp H.* Resting-state theta band connectivity and graph analysis in generalized social anxiety disorder. *NeuroImage: Clinical.* 2017. 13: 24–32.

COHERENCE OF THE TETA1-BAND EEG IN A STATE OF RELATIVE REST AND DURING ATTENTION TESTING IN SUBJECTS WITH DIFFERENT LEVELS OF TRAIT ANXIETY

T. D. Dzhebrailova^{a, #}, I. I. Korobeinikova^{b, ##}, N. A. Karatygin^b, Y. A. Venerina^a, and E. V. Yantikova^a

^a I.M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University), Moscow, Russia

^b Anokhin Institute of Normal Physiology, Moscow, Russia

[#]e-mail: dzhebrailova@mail.ru

^{##}e-mail: i_korobeinikova@mail.ru

Anxiety has a significant impact on the effectiveness of cognitive activity, which may be due to the peculiarities of the organization of voluntary and involuntary attention in individuals with different anxiety. Aim: to examine functional cortical connections in subjects with different levels of trait anxiety in a state of relative rest and when performing an attention test with usage of the coherent analysis of the teta1-band EEG (4–6 Hz). Coherence of teta1-band of EEG was analyzed in subjects (43 people, men aged 19–21 years) with low, medium and high level of trait anxiety (TA, according to C.D. Spielberger) in three experimental situations: the state of relative rest with closed eyes, the initial state before performing the test (with eyes opened) and during the test (red-black tables of F.D. Gorbov). Subjects with high TA in the state of relative rest with their eyes closed had a lower right-hemisphere coherence of the teta1-band EEG in the system of interrelations with focus in the temporal lead. In the initial state, with eyes opened and during test performing, individuals with high TA showed high level of interhemispheric coherence of the teta1-band of EEG. The highest lability of the structure of coherent relationships in the teta1-range of the EEG was observed in subjects with medium TA, who demonstrated an increase mainly in the interhemispheric coherence of most areas of the cortex during the test compared to the initial state. Individuals with high TA were characterized by relative inertia of the structure of coherent relationships in the teta1-range of the EEG at the stages of examination. The results of the study indicate that trait anxiety is one of the factors modulating the organization of neurocognitive networks both in a state of relative rest and during attention testing.

Keywords: anxiety, attention, coherence, teta1-EEG range