

DOI: 10.7868/S0869813918100088

**ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕТА-РИТМА ЭЭГ
И ВРЕМЯ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ВНИМАНИЯ
В УСЛОВИЯХ ЭКЗОГЕННЫХ ПОМЕХ**

© И. И. Коробейникова,¹ Н. А. Каратыгин,¹ Е. В. Бирюкова,²
Я. А. Венерина²

¹ Научно-исследовательский институт нормальной физиологии им. П. К. Анохина,
Москва, Россия

² Первый Московский государственный медицинский
университет им. И. М. Сеченова Минздрава РФ, Москва, Россия
E-mail: i_korobeinikova@mail.ru

У испытуемых ($n = 43$; мужчины 19—21 года) исследовали пространственные характеристики тета-активности и результативность когнитивной деятельности с переключением внимания, которая моделировалась при помощи компьютеризованного теста Горбова—Шульте (красно-черные таблицы) в условиях голосовой помехи. По изменению результативности деятельности в условиях слуховых помех выделены группы устойчивых к помехам ($n = 17$) и неустойчивых к помехам ($n = 18$) испытуемых. Анализ когерентных взаимоотношений тета-потенциалов ЭЭГ на разных этапах обследования выявил определенную топографическую сеть функциональных связей по тета-ритму, объединяющую височные, центральные и фронтальные зоны коры головного мозга с локализацией фокуса этих связей в левой височной области. В исходном состоянии у помехоустойчивых испытуемых в отличие от помехонеустойчивых уровень функционального взаимодействия на основе тета-потенциалов между входящими в эту сеть областями был значимо ниже. При выполнении тестов у устойчивых к помехам испытуемых в отличие от помехонеустойчивых наблюдалось значимое увеличение кооперации в тета-полосе между областями коры в пределах выявленной топографической сети. Обсуждается роль тета-ритма в функциональном объединении структур мозга при выполнении когнитивной деятельности с переключением внимания.

Ключевые слова: когнитивная деятельность, помехоустойчивость, переключение внимания, ЭЭГ, когерентность тета-ритма.

Рос. физиол. журн. им. И. М. Сеченова. Т. 104. № 10. С. 1215—1226. 2018

I. I. Korobeinikova,¹ N. A. Karatygin,¹ E. V. Birukova,² Ya. A. Venerina.² SPATIAL CHARACTERISTICS OF EEG THETA RHYTHM AND ATTENTION SWITCHING TIME IN CONDITIONS OF EXOGENOUS NOISE. ¹ P. K. Anokhin Research Institute of Normal Physiology, Moscow, Russia; e-mail: i_korobeinikova@mail.ru; ² I. M. Sechenov First Moscow State Medical University, Moscow Russia.

The main aim of present study was to explore spatial characteristics of theta activity and efficiency of cognitive activity with attention switching. EEG was registered while right-handed healthy participants ($n = 43$; 19—21 year old) passed through Gorbov-Shulte's computer-aided test in form of red-black tables accompanied by the voice noise. Group of noise stable ($n = 17$) and noise non-stable ($n = 18$) subjects were marked, basing on differences between efficiency of their cognitive activity. Analysis of coherent interactions of EEG theta potentials on different stages of examination detected a determined topographic net of functional bonds of theta rhythm, which combines temporal, central and frontal zones of cortex with focus localization in the left temporal area. It was revealed that noise sustainable subjects had lower level of functional bonds of theta rhythm between areas, which were included into the net in resting state, comparing to noise non-sustainable subjects. Furthermore, it was noticed that noise sustainable subjects had a significant increase of cooperation in theta range between areas of cortex, included into determined topographic net while doing test, comparing to noise non-sustainable subjects. Basing on this date, role of theta rhythm in functional association of brain structures during cognitive activity with attention switching is discussed.

Key words: cognitive activity, noise resistance, attention switching, EEG, theta rhythm coherence.

RUSSIAN JOURNAL OF PHYSIOLOGY. V. 104. N 4. P. 1215—1226. 2018

Внимание, означающее способность человека сосредотачиваться на выполняемой им деятельности и умение отключаться от всех побочных раздражителей, является одним из важнейших условий осуществления любого вида деятельности. Необходимым условием успешного выполнения многих задач является способность быстрого переключения внимания с одного вида деятельности на другой с сохранением ее высокой результативности. Актуальность исследований в этой области обусловлена ростом информационной и психической нагрузки в современном мире, интересами профессиональной ориентации и профилактической медицины. Особенно актуально сохранение высокого уровня внимания в условиях, осложненных экзогенными помехами. Здесь на первый план выходит помехоустойчивость, т. е., по определению В. Д. Небылицина, способность сохранять нормальный уровень функционирования при действии «шума», который часто не поддается устранению [8]. Особую значимость приобретают исследования помехоустойчивости в сфере профессионального отбора кадров на специальности, связанные с работой, при выполнении которой велик риск ошибочных действий, ведущих к серьезным последствиям. Поэтому требуются методы, позволяющие дать точный прогноз профессиональной надежности человека.

Наличие внешних помех, в условиях обязательности получения полезного приспособительного результата, способствует развитию эмоционального напряжения, поэтому помехоустойчивость прямо связана со стрессоустойчивостью, т. е. способностью человека переносить большие физические и умственные нагрузки, успешно решать задачи в осложненных ситуациях. Уровень стрессоустойчивости зависит от функциональной организации индивидуального мозга, которая определяется как его природными свойствами, например исходным уровнем активации коры [4], так и влиянием на него средовых факторов [6]. В этой связи большое значение имеет поиск психофизиологических коррелятов уровня помехоустойчивости человека.

Согласно современным представлениям, функциональная роль тета-ритма в организации системной деятельности мозга не ограничивается только регуляцией эмоций. П. К. Анохин полагал, что увеличение в ЭЭГ тета-ритма может являться признаком готовности испытуемого к выполнению деятельности, отражать рабочее напряжение [1]. Доказательством этому послужили исследования, где показано увеличение мощности тета-ритма ЭЭГ при когни-

тивной и операторской деятельности, решении в уме сложных задач, эффективном кодировании в памяти новой информации с последующим воспроизведением [26]. Мощность тета-ритма возрастает в ответ на когнитивную нагрузку и отражает такие неспецифические факторы, как общий уровень внимания, уровень трудности и успешность решения заданий [24, 32].

В конце прошлого столетия Т. Demiralp и соавт. [20] сформулировали представления о существовании диффузной тета-системы, включающей структуры гиппокампа, гипоталамуса, поясную извилину, ассоциативные лобные и теменные зоны коры головного мозга. Авторы выдвинули гипотезу, согласно которой резонансные явления в диффузной тета-системе, возникающие на фоне генерации тета-ритма, создают условия повышенной нейронной пластичности, необходимой для активной переработки, передачи и запоминания информации. Структуры диффузной тета-системы, с одной стороны, входят в морфофункциональный субстрат эмоций [18], с другой — играют определенную роль в регуляции целенаправленного внимания [20].

Поскольку исходя из приведенных данных тета-ритм выступает, с одной стороны, как регулятор эмоциональной сферы, а с другой — сопровождает успешность когнитивной деятельности и опосредует реализацию процессов внимания и памяти, было сделано предположение, что изменение спектрально-пространственных характеристик тета-ритма может являться прогностическим коррелятом времени переключения внимания в условиях экзогенных помех. Проверка данного предположения явилась целью настоящего исследования.

МЕТОДИКА

В исследовании на основе добровольного информационного согласия принимали участие 43 человека, юноши 19—21 года, правши с нормальной остротой зрения. Процедура обследования соответствовала стандартам локального этического комитета Первого МГМУ им. И. М. Сеченова.

Организация и методы обследования. Целенаправленная деятельность моделировалась при помощи компьютеризованного теста Горбова—Шульте (красно-черные таблицы), который используется для оценки концентрации и скорости переключения внимания [13]. Во время обследования испытуемый находился в удобном кресле перед экраном монитора (17 дюймов). На мониторе отображалась квадратная таблица, состоящая из 24 красных и 25 черных квадратных ячеек с собственными номерами. Паттерны расположения пронумерованных квадратов для каждой серии были изначально заданы методом случайной генерации. Для всех испытуемых использовался одинаковый набор паттернов. Проведено две серии обследований, каждая из которых включала два задания. В первой серии на основе предварительной инструкции испытуемый должен был в первом задании (ЧК1) выбрать (указать курсором мыши) черные квадраты в порядке возрастания их номерных обозначений (от 1 до 25) и красные квадраты в порядке убывания их номеров (от 24 до 1). Во втором задании (ЧК2) испытуемый должен был выбрать по очереди черные квадраты в порядке возрастания, а красные в порядке убывания: 1-й черный, 24-й красный, 2-й черный, 23-й красный и т. д. Во второй серии обследования испытуемому предлагали выполнить те же задания в сопровождении голосовой помехи: чтение диктором цифр от 1 до 25 в случайном порядке, не совпадающим с порядком указания испытуемым номеров квадратов и с частотой одна цифра в две секунды.

По результатам выполнения заданий для каждого испытуемого вычисляли следующие показатели:

— время между последовательными кликами по квадратам, величина которого усреднялась по каждому заданию (среднее время клика, мс);

— общее время выполнения каждого задания (с);

— число ошибок в каждом задании — включая ошибки последовательности и неверное указание цвета квадрата. Если испытуемый сбивался и отказывался от дальнейшего выполнения задания, оставшееся количество квадратов расценивалось как ошибки.

По результатам выполнения заданий в двух сериях обследования рассчитывалось время переключения внимания (ВПВ1 и ВПВ2) как разница между временем выполнения заданий ЧК2 и ЧК1. Разницу между ВПВ2 и ВПВ1 расценивали как характеристику помехоустойчивости испытуемого (показатель помехоустойчивости ППУ). Помехоустойчивыми считались испытуемые, которые в условиях ГП показывали меньшее ВПВ, т. е. ППУ имел отрицательные значения. Испытуемые, которые в условиях ГП демонстрировали большее время поиска цифр и ППУ соответственно имел положительные значения, характеризовались как помехонеустойчивые.

ЭЭГ регистрировали в исходном состоянии при закрытых (Фон ЗГ) и открытых глазах (Фон ОГ) и при выполнении заданий без голосовой помехи (ЧК1 и ЧК2) и при ее наличии (ЧК1 + ГП и ЧК2 + ГП) с помощью электроэнцефалографа «Нейрон-спектр» (г. Иваново) монополярно по схеме 10—20 в (О2, О1), теменных (Р4, Р3), центральных (С4, С3), лобных (F4, F3) и височных (Т4, Т3) 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. 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). Артефакты исключали из анализируемой записи с использованием возможностей программного комплекса «BRAINSYS». Спектрально-когерентный анализ ЭЭГ проводили на основе быстрого преобразования Фурье (пакет программ BRAINSYS). Эпоха анализа составляла 4 с при длительности каждого фрагмента в 1 мин, частота оцифровки — 200 Гц. Для всех пар отведений вычисляли средние значения функции когерентности (Кког) в тета-диапазоне (4—7 Гц) ЭЭГ.

Для *статистической обработки* и представления результатов использовали пакет Statistica v.6. При нормальном распределении анализируемых показателей вычисляли среднее значение (M) и стандартную ошибку среднего (m). Достоверность различий анализируемых показателей у студентов выделенных групп оценивали с помощью дисперсионного анализа «Breakdown and one-way ANOVA». Достоверность изменения значений показателей в разных ситуациях у одной группы испытуемых оценивали с использованием t -критерия для связанных выборок.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ ВПВ показал, что в среднем по группе испытуемых оно составило в первой серии обследования 101.1 ± 5.3 с при минимальных и максимальных значениях 35.2 и 176.7 с и во второй серии при наличии ГП 100.6 ± 5.2 с при минимальных и максимальных значениях 48.3 и 179.9 с соот-

Таблица 1

Параметры результата выполнения теста «Красно-черные таблицы»
у испытуемых 1-й и 2-й групп

Параметры результата	1-я группа	2-я группа	<i>p</i>
ВПВ 1, с	125.7 ± 6.6	85.7 ± 7.1	0.0003
ВПВ 2, с	87.0 ± 7.9	119.1 ± 6.3	0.003
ВПВ2-ВПВ1 (ППУ), с	-38.6 ± 4.9	33.4 ± 4.7	0.000
ЧК1, t клика, мс	1968 ± 61.4	2081 ± 106.2	—
ЧК1, t выполнения, с	98.5 ± 3.1	105.4 ± 5.5	—
ЧК1 ошибки	0.25 ± 0.1	0.68 ± 0.4	—
ЧК1 + ГП, t клика, мс	2005 ± 59.1	1963 ± 112.2	—
ЧК1 + ГП, t выполнения, с	100.9 ± 2.9	97.7 ± 5.5	—
ЧК1 + ГП, ошибки	0.19 ± 0.1	0.16 ± 0.1	—
ЧК2, t клика, мс	4385 ± 189.9	3868 ± 193.3	0.049
ЧК2, t выполнения, с	224.1 ± 8.5	191.1 ± 9.7	0.017
ЧК2 ошибки	4.62 ± 0.9	2.26 ± 0.6	0.039
ЧК2 + ГП, t клика, мс	3835 ± 185.3	4321 ± 217.6	—
ЧК2 + ГП, t выполнения, с	187.2 ± 9.1	216.8 ± 10.4	0.043
ЧК2 + ГП, ошибки	2.68 ± 0.8	3.0 ± 0.7	—

ветственно. Значения ППУ изменялись от -71.3 до 65.6. На основании этого были выделены две группы испытуемых. В 1 группу помехоустойчивых (17 человек) вошли испытуемые, ВПВ которых снижалось в условиях ГП на 10 и более секунд. 2-ю группу помехонеустойчивых (18 человек) составили испытуемые, у которых ВПВ в условиях помехи увеличивалось на 10 с и более.

Параметры результатов выполнения заданий представлены в табл. 1. Из таблицы следует, что ВПВ в условиях ГП (ВПВ2) у испытуемых 1-й группы достоверно ($p = 0.0007$) снижался, у испытуемых 2-й группы достоверно ($p = 0.0012$) увеличивался. По результативности задания ЧК1, как в условиях ГП, так и без нее, испытуемые выделенных групп достоверно не различались. По параметрам результата выполнения более сложного задания ЧК2 испытуемые 1-й группы отличались от испытуемых 2-й достоверно большим временем клика, временем выполнения и большим количеством допущенных ошибок. Наличие ГП приводило к противоположным результатам. Анализ параметров результата в пределах каждой группы показал, что при выполнении ЧК2 + ГП по сравнению с ЧК2 у испытуемых 1-й группы снижалось время клика ($p = 0.046$) и время выполнения ($p = 0.0057$), у испытуемых 2-й группы наблюдалось достоверное ($p = 0.049$) увеличение времени выполнения ЧК2 + ГП. Это приводило к тому, что в этой ситуации у испытуемых 1-й группы по сравнению с испытуемыми 2-й имело место меньшее время выполнения задания (табл. 1).

Таким образом при выполнении ЧК2 в условиях ГП у испытуемых 1-й группы в отличие от испытуемых 2-й наблюдалось снижение исходно высокого времени его выполнения и уменьшение количества допущенных ошибок.

Анализ ЭЭГ в диапазоне тета-ритма (4—7 Гц) показал, что по спектральной мощности тета-ритма испытуемые выделенных групп достоверно не отличались между собой в исходном состоянии как при ЗГ, так и ОГ, а также при выполнении тестов.

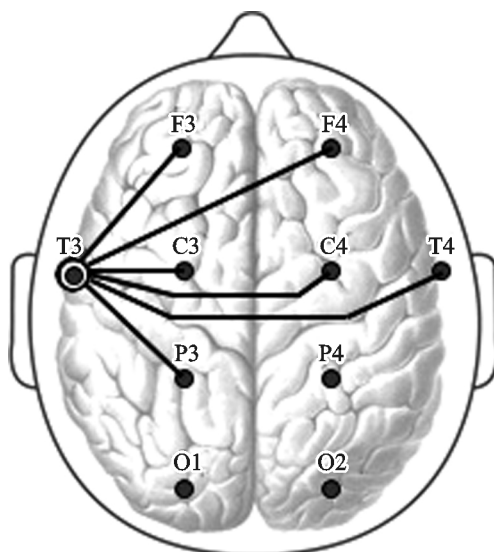


Схема топографического расположения когерентных связей биопотенциалов тета-диапазона ЭЭГ. Линиями обозначены связи между областями коры, где Кког биопотенциалов тета-диапазона ЭЭГ в исходном состоянии был достоверно ниже у студентов 1-й группы по сравнению со 2-й.

Анализ Кког биопотенциалов тета-диапазона ЭЭГ, зарегистрированной в исходном состоянии (Фон ЗГ и Фон ОГ), показал, что у испытуемых 1-й группы по сравнению с испытуемыми 2-й имели место достоверно более низкие Кког в парах отведений Т3-Р3, Т3-С4, Т3-С3, Т3-Ф4, Т3-Ф3, Т3-Т4.

Для более наглядного представления выявленных различий по Кког биопотенциалов тета-полосы исходной ЭЭГ у испытуемых выделенных групп была построена схема топографического расположения когерентных связей биопотенциалов (см. рисунок). На схеме отображены связи между областями коры, где Кког биопотенциалов тета-диапазона ЭЭГ в исходном состоянии (Фон ЗГ и Фон ОГ) был достоверно ниже у студентов 1-й группы по сравнению со 2-й. Из рисунка отчетливо видно, что «фокус» взаимосвязанной активности биопотенциалов находится в левой височной области коры. Значимых различий Кког тета-потенциалов между другими зонами коры между испытуемыми выделенных групп в исходном состоянии не зарегистрировано.

Значения Кког тета-диапазона между указанными на рисунке областями коры во всех ситуациях обследования у испытуемых выделенных групп представлены в табл. 2. Из таблицы следует, что выявленные различия Кког тета-потенциалов между испытуемыми 1-й и 2-й групп, имеющие место в исходном состоянии при ЗГ и ОГ, нивелируются при выполнении тестов как при наличии ГП, так и без нее. Для выяснения причин таких изменений был проведен анализ динамики Кког на всех этапах обследования у испытуемых в пределах каждой группы. Было выявлено, что при выполнении ЧК1 у испытуемых 1-й группы в отличие от испытуемых 2-й наблюдалось значимое увеличение Кког относительно Фон ЗГ между Т3-Р3 ($p = 0.050$), Т3-С4 ($p = 0.030$), Т3-С3 ($p = 0.009$), Т3-Ф4 ($p = 0.049$), Т3-Ф3 ($p = 0.002$), Т3-Т4 ($p = 0.012$), а также относительно Фон ОГ между областями Т3-Ф3 ($p = 0.047$). При выполнении ЧК2 значимое увеличение относительно Фон ЗГ имело мес-

Таблица 2

Значения Кког тета-диапазона ЭЭГ ($M \pm m$) у испытуемых 1-й и 2-й групп в исходном состоянии (Фон ЗГ, Фон ОГ) и при выполнении тестов

Ситуация обследования	Группа	Пары отведений ЭЭГ						
		ТЗ-РЗ	ТЗ-С4	ТЗ-С3	ТЗ-Ф4	ТЗ-Ф3	ТЗ-Т4	
Фон ЗГ	1	0.521 ± 0.03	0.29 ± 0.02	0.404 ± 0.03	0.212 ± 0.03	0.268 ± 0.03	0.212 ± 0.02	
	2	0.655 ± 0.03	0.318 ± 0.03	0.557 ± 0.03	0.322 ± 0.03	0.466 ± 0.04	0.297 ± 0.03	
	<i>p</i>	0.002	0.014	0.004	0.016	0.0004	0.025	
Фон ОГ	1	0.549 ± 0.03	0.287 ± 0.03	0.465 ± 0.04	0.232 ± 0.03	0.315 ± 0.04	0.241 ± 0.02	
	2	0.646 ± 0.02	0.371 ± 0.03	0.563 ± 0.03	0.320 ± 0.02	0.462 ± 0.03	0.280 ± 0.02	
	<i>p</i>	0.013	0.042	0.038	0.042	0.007	—	
Тест ЧК1	1	0.596 ± 0.02*	0.354 ± 0.03*	0.537 ± 0.03*	0.307 ± 0.04*	0.423 ± 0.03*#	0.298 ± 0.02*	
	2	0.651 ± 0.03	0.419 ± 0.03	0.592 ± 0.03	0.355 ± 0.02	0.491 ± 0.03	0.344 ± 0.03	
	<i>p</i>	—	—	—	—	—	—	
Тест ЧК2	1	0.581 ± 0.03	0.352 ± 0.04*	0.531 ± 0.04*	0.316 ± 0.04*	0.431 ± 0.04*#	0.312 ± 0.03*#	
	2	0.645 ± 0.03	0.417 ± 0.03	0.594 ± 0.03	0.359 ± 0.02	0.493 ± 0.03	0.311 ± 0.03	
	<i>p</i>	—	—	—	—	—	—	
Тест ЧК1 + ГП	1	0.625 ± 0.02*#	0.374 ± 0.03*#	0.563 ± 0.03*#	0.314 ± 0.04*	0.443 ± 0.03*#	0.308 ± 0.02*#	
	2	0.660 ± 0.03	0.401 ± 0.03	0.604 ± 0.03	0.352 ± 0.03	0.511 ± 0.03	0.306 ± 0.03	
	<i>p</i>	—	—	—	—	—	—	
Тест ЧК2 + ГП	1	0.597 ± 0.02*	0.366 ± 0.03*	0.548 ± 0.03*	0.324 ± 0.03*	0.441 ± 0.03*	0.298 ± 0.02*	
	2	0.647 ± 0.03	0.404 ± 0.03	0.591 ± 0.03	0.345 ± 0.02	0.494 ± 0.03	0.296 ± 0.03	
	<i>p</i>	—	—	—	—	—	—	

Примечание. * Статистически значимые изменения Кког тета-диапазона ЭЭГ относительно Фон ЗГ; # относительно Фон ОГ, значения *p* приведены в тексте.

то также у испытуемых только 1-й группы между ТЗ-С3 ($p = 0.019$), ТЗ-Ф4 ($p = 0.050$), ТЗ-Ф3 ($p = 0.002$), ТЗ-Т4 ($p = 0.007$), относительно Фон ОГ между ТЗ-Ф3 ($p = 0.041$), ТЗ-Т4 ($p = 0.040$). При выполнении ЧК1 + ГП у испытуемых 1-й группы зарегистрировано значимое увеличение Кког относительно Фон ЗГ между ТЗ-Р3 ($p = 0.005$), ТЗ-С4 ($p = 0.015$), ТЗ-С3 ($p = 0.0012$), ТЗ-Ф4 ($p = 0.045$), ТЗ-Ф3 ($p = 0.0006$), ТЗ-Т4 ($p = 0.005$), относительно Фон ОГ между областями ТЗ-Р3 ($p = 0.010$), ТЗ-С4 ($p = 0.042$), ТЗ-С3 ($p = 0.046$), ТЗ-Ф3 ($p = 0.0018$), ТЗ-Т4 ($p = 0.032$). Кроме этого, у испытуемых этой группы в этой ситуации усиливается взаимодействие биопотенциалов тета-полосы между областями ТЗ-Р4 и Кког становится значимо ($p = 0.036$) выше исходных значений (Фон ЗГ). При выполнении ЧК2 + ГП Кког тета-полосы остается выше относительно фоновых значений (Фон ЗГ) между областями ТЗ-Р3 ($p = 0.047$), ТЗ-С4 ($p = 0.024$), ТЗ-С3 ($p = 0.003$), ТЗ-Ф4 ($p = 0.023$), ТЗ-Ф3 ($p = 0.0006$), ТЗ-Т4 ($p = 0.014$) только у испытуемых 1-й группы. При сравнительном анализе значений Кког тета-потенциалов при выполнении ЧК1, ЧК2 в условиях ГП и без нее значимых изменений не выявлено у испытуемых обеих групп.

Таким образом, у испытуемых 1-й группы в отличие от испытуемых 2-й при выполнении тестов наблюдалось значимое повышение исходно низких значений Кког тета-полосы ЭЭГ, что явилось причиной нивелирования различий Кког тета-потенциалов между испытуемыми выделенных групп при выполнении заданий.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В настоящем исследовании основанием деления испытуемых на группы было снижение или увеличение времени переключения внимания в условиях голосовой помехи, т. е. улучшение или ухудшение результативности деятельности. Таким образом, уже исходно было предположено, что испытуемые 1-й группы по сравнению с испытуемыми 2-й являются более устойчивыми к помехе. Обращает на себя внимание тот факт, что в условиях отсутствия голосовых помех эти испытуемые показали значимо большее время поиска цифр и большее количество ошибок. В этой связи представляют интерес исследования, где время простой реакции расценивалось как фактор помехоустойчивости испытуемых [15].

Анализ спектральных характеристик тета-ритма ЭЭГ не выявил значимых отличий между испытуемыми выделенных групп. В литературе имеются указания на независимость когерентных взаимоотношений от мощности исходных процессов [7, 17]. Анализ когерентных взаимоотношений тета-потенциалов установил, что улучшение результативности (уменьшение времени поиска цифр и количества ошибок) у помехоустойчивых испытуемых в условиях голосовых помех сопровождалось увеличением степени функционального взаимодействия (относительно исходного состояния) в височно-лобно-центральных отделах коры с фокусом взаимосвязанной активности в левой височной области. В отличие от них у помехонеустойчивых испытуемых значимых изменений коэффициентов когерентности при выполнении заданий как в условиях голосовых помех, так и без них не выявлено.

В ряде исследований синхронизацию в тета-полосе ЭЭГ связывают с процессами направленного внешнего внимания и сканирования памяти [3, 29], ее увеличение при выполнении творческих заданий с удержанием информации в рабочей памяти при длительном поддержании внимания [25, 27, 31]. В наших

предыдущих работах было также показано увеличение степени синхронизации тета-потенциалов у более результативных студентов при выполнении зрительно-пространственных задач [9].

Тета-ритм, зарегистрированный в височной и лобной коре, связывают с формированием кортиколимбических связей, необходимых для мнемических процессов [22, 23, 24], а также рассматривают как дискриминатор эмоциональных и мотивационных состояний [2, 16]. В качестве косвенного доказательства необходимости взаимодействия височных и фронтальных отделов коры для переключения внимания можно привести данные исследования когнитивных нарушений при поведенческой форме лобно-височной деменции, при которой наблюдаются трудности переключения от одного этапа когнитивной деятельности к следующему, трудности смены парадигмы деятельности, а также недостаточность функции контроля результата деятельности [5].

На наш взгляд, особого обсуждения заслуживает анализ выявленной в настоящем исследовании распределенной функциональной сети, которая объединяет на основе синхронизации по тета-ритму височные, лобные и центральные зоны коры обоих полушарий с фокусом активности в левой височной области. Установлено, что у испытуемых 1-й и 2-й групп исходный уровень функционального взаимодействия корковых зон в пределах этой сети различен.

Встает вопрос, почему регионарный фокус взаимосвязанной активности выявлен именно в левой височной области?

В первую очередь следует отметить, что поскольку в данном исследовании выполнение задания второй серии проходило на фоне голосовой помехи, то анализ ситуации производился с преимущественным участием левой височной коры, поскольку верхневисочные отделы левого полушария являются основным аппаратом анализа речевых звуков [11].

Учитывая специфику предложенной в настоящем исследовании задачи, следует обратить внимание на результаты исследований, где указывается на возможность выполнения вычислительных операций с опорой на аналитические стратегии именно левого полушария [14, 21]. Наличие фокуса функциональных связей в левой височной области, обнаруженного в настоящем исследовании, согласуется с данными работ, где показана активация лобных и лобно-височных структур левого полушария и рост функционального взаимодействия между ними при решении когнитивных задач в ситуации неопределенности [30] и при выработке стратегии когнитивной деятельности [10].

Таким образом, локализация регионарного фокуса взаимосвязанной активности тета-потенциалов в левой височной области с учетом специфики предложенного в настоящем исследовании задания (поиск квадратов с числами по возрастанию, убыванию или чередованию этих действий) представляется закономерной.

Не менее интересна выявленная в настоящем исследовании различная степень синхронизации биопотенциалов в полосе тета-ритма между левой височной областью и фронтальными и центральными отделами обоих полушарий у испытуемых с разным уровнем помехоустойчивости.

Экспериментально было показано, что тета-ритм является ритмом лимбических структур, вовлеченных в эмоциональное реагирование [28], а генератором его активности в первую очередь является гиппокамп [19]. Необходимо также учитывать, что гиппокамп наряду с префронтальной корой и другими корковыми и глубинными структурами мозга является частью функциональных нейронных объединений, которые формируются в период удержания ин-

формации в рабочей памяти [12]. В связи с этим считается доказанным, что согласованные изменения активности гиппокампа и вентромедиальной префронтальной коры коррелируют с успешностью выполнения когнитивного задания. Анализ временных параметров активации лобной коры и гиппокампа и их сопоставление с показателями когнитивной деятельности позволили прийти к заключению, что гиппокамп осуществляет быстрое связывание отдельных элементов событий в интегрированные репрезентации, которые затем передаются в вентромедиальную префронтальную кору для хранения и будущего использования [34]. Поскольку в настоящем исследовании испытуемый для указания квадратов должен был совершать движения рукой, вполне предсказуема синхронизация активности центральных областей коры, включающих моторную и соматосенсорную зоны, со структурами диффузной тета-системы левого полушария. Такая синхронизация согласуется с данными об эффективности использования низкочастотного компонента (< 7 Гц) электрической активности моторной коры для декодирования движений руки в интерфейсах мозг—компьютер [33].

Принимая во внимание вышеизложенное, следует полагать, что усиление функциональной кооперации височных лобных и центральных областей коры на основе тета-ритма при выполнении когнитивных заданий, требующих высокой скорости переключения внимания, является одним из необходимых факторов для достижения высоких результатов в условиях, осложненных экзогенными помехами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По изменению скорости переключения внимания в условиях слуховых помех выделены группы устойчивых и неустойчивых к помехе испытуемых. Анализ когерентных взаимоотношений тета-потенциалов ЭЭГ на разных этапах обследования выявил определенную топографическую сеть функциональных связей, объединяющую височные, центральные и фронтальные зоны коры головного мозга с локализацией фокуса этих связей в левой височной области. В исходном состоянии при закрытых и открытых глазах у помехоустойчивых испытуемых, в отличие от помехонеустойчивых уровень функционального взаимодействия на основе тета-потенциалов между входящими в эту сеть областями был значимо ниже. При выполнении заданий у помехоустойчивых испытуемых в отличие от помехонеустойчивых наблюдалось значимое увеличение кооперации в тета-полосе между областями коры в пределах выявленной топографической сети.

Таким образом, одним из электрофизиологических коррелятов устойчивости испытуемых к экзогенным слуховым помехам является исходно низкая степень функционального взаимодействия по тета-ритму височно-центральных лобных областей коры и ее увеличение в условиях выполнения когнитивной деятельности, требующей высокого уровня произвольного внимания и высокой скорости его переключения.

Данные настоящего исследования указывают на роль тета-ритма в функциональном объединении структур мозга при выполнении когнитивной деятельности с переключением внимания и могут быть использованы для создания методов прогноза ее результативности в условиях экзогенных помех.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Анохин П. К. Биология и нейрофизиология условного рефлекса. М. Медицина. 1968. [Anokhin P. K. Biology and neurophysiology of conditioned reflex. Moscow. Medicina. 1968. (In Russ.)].
- [2] Афтанас Л. И. Эмоциональное пространство человека: психофизиологический анализ. Новосибирск. Изд-во СО РАМН. 2000. [Aftanas L. I. Emotional space of a person: psychophysiological analysis. Novosibirsk. RAMN. 2000. (In Russ.)].
- [3] Болдырева Г. Н. Электрическая активность мозга человека при поражении диэнцефальных и лимбических структур. М. Наука, МАИК «Наука/периодика». 2000. [Boldyreva G. N. Electrical brain activity of men with diencephalon and limbic structures damage. Moscow. Nauka. 2000. (In Russ.)].
- [4] Голикова Ж. В., Стрелец В. Б. Развитие экзаменационного стресса у лиц с разным уровнем корковой активации. Журн. высш. нерв. деятельности. 53(6): 697—704. 2003. [Golikova J. V., Strelets V. B. Development of Examination Stress in Subjects with Different Levels of Cortical Activation. J. Neurosci. Behav. Physiol. 53(6): 697—704. 2003. (In Russ.)].
- [5] Гришина Д. А., Захаров В. В., Яхно Н. Я. Когнитивные нарушения при поведенческой форме лобно-височной деменции. Неврологический журн. 21(6): 330—337. 2016. [Grishina D. A., Zakharov V. V., Yakhno N. N. Cognitive disorders in behavioral variant of frontotemporal dementia. Neurolog. J. 21(6): 330—337. 2016. (In Russ.)].
- [6] Данилова Н. Н. Стрессоустойчивость как индивидуальная особенность. Сб. докладов межд. конф. памяти А. Р. Лурия. Под ред. Е. Д. Хомской, Т. В. Ухутиной. 177—192. 1998. [Danilova N. N. Stress resistance as an individual treat. Proc. Internat. Confer. In memory of A. R. Luria. Eds E. D. Homskoy, T. V. Uhtinoy. 177—192. 1998. (In Russ.)].
- [7] Думенко В. Н. Функциональное значение высокочастотных компонентов электрической активности головного мозга в процессах формирования внутренних образов. Журн. высш. нерв. деятельности. 52(5): 539—550. 2002. [Dumenko V. N. Functional meaning of high frequency components of electrical brain activity in processes of forming of internal image. J. Neurosci. Behav. Physiol. 52(5): 539—550. 2002. (In Russ.)].
- [8] Душков Б. А., Ломов Б. Ф., Смирнов Б. А. Хрестоматия по инженерной психологии. Под ред. Б. А. Душкова. Учебн. пособие. М. Высш. школа. 1991. [Dushkov B. A., Lomov B. F., Smirnov B. A. Textbook on engineering psychology / Ed. Dushkov B. A. — M. Vish. shkola. 1991. (In Russ.)].
- [9] Коробейникова И. И. Связь пространственной синхронизации биопотенциалов тета-диапазона ЭЭГ человека с успешностью выполнения зрительно пространственных задач. Физиология человека. 37(5): 26—34. 2011. [Korobeinikova I. I. Relationship of spatial synchronization of θ band bioelectric potentials of human EEG with the success of visual spatial task performance. Human Physiology. 37(5): 537—544. 2011 (In Russ.)].
- [10] Кошельков Д. А., Мачинская Р. И. Функциональное взаимодействие корковых зон в процессе выработки стратегии когнитивной деятельности. Анализ когерентности тета-ритма ЭЭГ. Физиология человека. 36(6): 55—60. 2010. [Koshelkov D. A., Machinskaya R. I. Functional coupling of cortical areas during problem solving task: An analysis of theta rhythm coherence. Human Physiology. 36(6): 665—669. 2010. (In Russ.)].
- [11] Лурия А. Р. Высшие корковые функции человека и их нарушения при локальных поражениях мозга. М. Изд-во МГУ. 1962. [Luria A. R. Higher cortical functions in man and their disturbances in local brain lesions. Moscow. MSU. 1962. (In Russ.)].
- [12] Мачинская Р. И. Управляющие системы мозга Журн. высш. нерв. деятельности. 65(1): 33—60. 2015. [Machinskaya R. I. The brain executive systems. J. Neurosci. Behav. Physiol. 65(1): 33—60. 2015. (In Russ.)].
- [13] Методика Горбова «Красно-черная таблица». Альманах психологических тестов. М. 1995. [Gorbov's test «Black-red tables». Moscow. 1995].
- [14] Морозова Л. В. Специфика психофизиологического обеспечения зрительного восприятия детей 7—8 лет с разным темпом его формирования. Журн. медико-биол. исследований. 1: 63—72. 2016. [Morozova L. V. Peculiarities of psychophysiological support of visual perception in children aged 7—8 years with various rates of its formation. J. Medico-Biol. Res. 1: 63—72. 2016. (In Russ.)].
- [15] Поповская М. Н., Таран И. И. Свойства нервной системы как факторы помехоустойчивости баскетболистов массовых разрядов. Научно-теоретический журн. Ученые

записки. 8(114): 152—155. 2014. [*Popovskaya M. N., Taran I. I.* Nervous system properties as factors of interference of mass degrees basketball players. *Scientis-teoretic. J.* 8(114): 152—155. 2014. (In Russ.)].

[16] *Разумникова О. М.* Мышление и функциональная асимметрия мозга. Новосибирск. Изд-во СО РАМН. 2004. [*Razumnikova O. M.* Intellection and functional asymmetry of brain. Novosibirsk. RAMN. 2004. (In Russ.)].

[17] *Свидерская Н. Е., Королькова Т. А.* Пространственная организация электрических процессов мозга: проблемы и решения. Журн. высш. нерв. деятельности. 47(5): 792—811. 1997. [*Sviderskaya N. E., Korolkova T. A.* Spatial organization of electric processes in brain: problems and decisions]. *J. Neurosci. Behav. Physiol.* 47(5): 792—811. 1997. (In Russ.)].

[18] *Судаков К. В.* Индивидуальная устойчивость к эмоциональному стрессу. М. 1998. [*Sudakov K. V.* Individual resistance to an emotional stress. Moscow. 1998. (In Russ.)].

[19] *Arnold D. E. A. T., Lopes da Silva F. H., Aitink J. W., Kamp A., Boeijinga P.* The spectral properties of hippocampal EEG related to behaviour in man. *EEG and Clin. Neurophysiol.* 50: 324—328. 1980.

[20] *Demiralp T., Basar-Eroglu C., Rahn E., Basar E.* Event-related theta rhythms in cat hippocampus and prefrontal cortex during an omitted stimulus paradigm. *Intern. J. Psychophysiol.* 1: 5—48. 1994.

[21] *Georgopoulos A. P., Whang K., Georgopoulos M. A., Tagaris G. A., Amirikian B., Richter W., Kim S. G., Ugurbil K.* Functional magnetic resonance imaging of visual object construction and shape discrimination: relations among task, hemispheric lateralization, and gender. *J. Cognitive Neurosci.* 31: 72—89. 2001.

[22] *Herweg N. A., Apitz T., Leicht G., Mulert C., Fuentemilla L., Bunzeck N.* Theta-alpha oscillations bind the hippocampus, prefrontal cortex, and striatum during recollection: evidence from simultaneous EEG-fMRI. *J. Neurosci.* 36(12): 3579—3587. 2016.

[23] *Kirk I. J., Mackay J. C.* The role of theta-range oscillation in synchronizing and integrating activity in distributed mnemonic network. *Cortex.* 39(4—5): 993—1008. 2003.

[24] *Klimesch W.* EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: a review and analysis. *Brain. Res. Rev.* 29: 169—195. 1999.

[25] *Klimesch W., Hanslmayr S., Sauseng P., Gruber W., Brozinsky C. J., Kroll N. E. A., Yonelinas A. P., Doppelmayr M.* Oscillatory EEG correlates of episodic trace decay. *Cerebral Cortex.* 16: 280—290. 2006.

[26] *Krause C. M., Viemero V., Rosenqvist A., Sillanmaki L., Astrom T.* Relative electroencephalographic desynchronization and synchronization in humans to emotional film content: an analysis of the 4—6, 6—8, and 8—10 Hz frequency band. *Neurosci. Lett.* 286(1): 9—12. 2000.

[27] *Kubota Y., Sato W., Toichi M., Murai T., Okada T., Hayashi A., Sengoku A.* Frontal midline theta rhythm is correlated with cardiac autonomic activities during the performance of an attention demanding meditation procedure. *Cogn. Brain Res.* 11(2): 281. 2001.

[28] *Lopes da Silva F. H.* Brain rhythms: regional specificity and generalized systems. *Electroencephalography and clinical Neurophysiology. Abstracts of the XI 11th Intern. Congr. of Electroencephalography and Clin. Neurophysiol.* 2: 8. 1993.

[29] *Molle M., Marshael L., Fehm H. L., Born J.* EEG Theta synchronization confined with alpha desynchronization indicate intentional encoding. *Eur. J. Neurosci.* 923—928. 2002.

[30] *Newman S. D., Just M. A., Carpenter P. A.* The synchronization of the human cortical working memory network. *Neuroimage.* 15: 810—822. 2002.

[31] *Raghavachari S., Lisman J. E., Tully M., Madsen J. R., Bromfield E. B., Kahana M. J.* Theta oscillations in human cortex during a working memory task: evidence for local generators. *J. Neurophysiol.* 95: 1630—1638. 2006.

[32] *Sauseng P., Klimesch W., Schabus M., Doppelmayr M.* Fronto-parietal EEG coherence in theta and upper alpha reflect central executive functions of working memory. *Int. J. Psychophysiol.* 57(2): 97—103. 2005.

[33] *Stephan W., Preissl H., Demandt E., Braun C., Birbaumer N., Aertsen A., Mehring C.* Hand movement direction decoded from MEG and EEG. *J. Neurosci.* 28(4): 1000—1008. 2008.

[34] *Zeithamova D., Dominick A. L., Preston A. R.* Hippocampal and ventral medial prefrontal activation during retrieval mediated learning supports novel inference. *Neuron.* 75(1): 168—179. 2012.

Поступила 26 VI 2018
После доработки 15 VIII 2018