

**ФИЗИОЛОГИЯ ВЫСШЕЙ НЕРВНОЙ (КОГНИТИВНОЙ)  
ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА**

УДК 612.825+316.454.54

**СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕТА- И АЛЬФА-РИТМОВ ЭЭГ  
В ПОКОЕ У ГРУПП ИСПЫТУЕМЫХ С РАЗЛИЧНОЙ  
РЕЗУЛЬТАТИВНОСТЬЮ СОВМЕСТНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В ДИАДАХ**

© 2023 г. Е. П. Муртазина\*, Ю. А. Гинзбург-Шик

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

\*e-mail: e.murtazina@nphys.ru

Поступила в редакцию 09.06.2021 г.

После доработки 18.08.2022 г.

Принята к публикации 31.10.2022 г.

Цель исследования состояла в сравнительном анализе спектральных характеристик тета- и альфа-ритмов фоновых ЭЭГ между группами испытуемых с различной результативностью последующей совместной сенсомоторной деятельности в диадах. Обследовано 26 мужчин, которые в 13 парах выполняли тренировки “Столбики” с биологической обратной связью от ЭМГ-сигналов мышц сгибателей кисти ведущей руки. По результативности испытуемые каждой пары были отнесены к одной из 2 групп: “победители” или “проигравшие”. Обнаружена более высокая спектральная мощность тета-ритма ЭЭГ с закрытыми глазами в группе “проигравших” по сравнению с группой “победителей”, во фронтальных, центральных и височных зонах коры. У “победителей” выявлен более высокий уровень спектральной мощности альфа-ритма ЭЭГ при закрытых глазах в большинстве зон коры, особенно в альфа2-диапазоне частот. Результативность индивидуальных и совместных тренировок отрицательно коррелировала со спектральными мощностями тета- и положительно с активностью альфа-ритмов ЭЭГ в состоянии с закрытыми глазами.

*Ключевые слова:* ЭЭГ покоя, тета-ритм, альфа-ритм, сенсомоторный тест, совместная деятельность, конкуренция, кооперация

DOI: 10.31857/S0044467723010112, EDN: GJUMWO

Все более актуально изучение нейрофизиологических механизмов социальных взаимодействий, при которых люди должны понимать намерения и действия других, эффективно адаптироваться к внутренним и внешним эмоциональным событиям и модулировать поведение для достижения высокой степени координации моторных и когнитивных процессов (Drigas et al., 2018).

Выявлены взаимосвязи активности различных областей головного мозга с личностными характеристиками испытуемых, определяющими особенности их взаимоотношений в социуме, в том числе чувства эмпатии (Mu et al., 2008; Balconi, Vanutelli, 2017), социальных и коммуникативных навыков (Petit et al., 2020), доминантности и восприятия социальных рангов (Муртазина и др., 2020), агрессии и избегания конфликтов (Князев и др., 2011), экстраверсии, приятности и ней-

ротизма (Knyazev et al., 2019; Klados et al., 2020), социальной тревожности (Al-Ezzi et al., 2020).

Социальные отношения у многих людей вызывают психоэмоциональное напряжение и даже рост тревожности, особенно в конкурентных контекстах или при высокой степени неопределенности исхода взаимодействий. Эти состояния отражаются в усилении активности тета-ритма ЭЭГ в различных структурах мозга. Так, показано, что повышение фронтальной дельта- и тета-активности наблюдалось в социально-эмоциональных ситуациях (Mu et al., 2008; Balconi et al., 2015), а также было характерно для процессов восприятия людьми аффективных и социальных невербальных сигналов партнеров, в отличие от информационных (Balconi, Fronda, 2020). При этом в этой работе выявлена асимметрия изменений тета-активности в зависи-

мости от знака валентности сигналов при межсубъектных взаимодействиях.

Выявлено, что контекст социальных отношений (индивидуальный, конкурентный или кооперативный) оказывал существенное влияние на характер изменения спектрально-когерентных характеристик в дельта-, тета- и альфа-диапазонах частот в лобных и височных зонах коры (Balconi, Vanutelli, 2018; Coomans et al., 2021).

Высокая социальная тревожность также коррелировала с усилением кросс-частотной связи спектральных мощностей тета1 (4–6 Гц) и бета (13–29 Гц) ритмов в состоянии тревожного ожидания публичного выступления с самопрезентацией (Miskovic V. et al., 2010). Выявлено, что психосоциальный стресс во время решения задач на внимание сопровождался синхронизацией альфа-активности и относительным увеличением бета-мощности, которая положительно коррелировала с тревожностью и увеличением частоты пульса, но отрицательно — с показателями точности деятельности (Palacios—García et al., 2021).

Обнаружено, что стимуляция правой дорсолатеральной префронтальной коры в тета-диапазоне частот влияла на контроль просоциального поведения у людей в процессе игры “Диктатор” (Zinchenko et al., 2021).

Считается, что одним из основных нейрофизиологических субстратов эмоционального интеллекта и функционирования “социального мозга” является зеркальная система (Rizzolatti, Sinigaglia, 2008). Отражением функционирования системы зеркальных нейронов мозга при восприятии чужой деятельности и выполнении наблюдаемых действий является интеграция перцептивных и моторных процессов в сенсомоторных областях коры, которая проявляется в реактивности альфа-ритма, а также мю- и бета-ритмов ЭЭГ роландической области (Perry et al., 2011; Babiloni et al., 2016; Fox et al., 2016). Указанные ритмы принято называть центральными или сенсомоторными, их изучение позволяет объективно и неинвазивно оценивать активность зеркальной системы мозга человека.

Выявлены значимые позитивные корреляции между амплитудой альфа-ритма ЭЭГ в лобных и центральных отведениях правого полушария у испытуемых в состоянии покоя с открытыми и закрытыми глазами с показателями чувства эмпатии, уровнями общего и эмоционального интеллекта (Павленко и др., 2018).

Между испытуемыми в диадах обнаружены различия в степени подавления фронтальной мощности альфа-ритма ЭЭГ как в фоне, так и в процессе кооперативной деятельности в задаче с синхронным постукиванием пальцами (Konvalinka et al., 2014). Такое подавление было более выраженным у испытуемых, которые становились лидерами по сравнению с партнерами, которые занимали позицию последователя. Авторы полагают, что лидеры вкладывают больше ресурсов в перспективное планирование и контроль совместной деятельности. Результаты этого исследования показывают, что распределение ролей и возникновение взаимоотношений лидер—последователь можно определить по спектральным характеристикам ЭЭГ-активности испытуемых, выявленным до и во время их взаимодействий.

Многие исследователи отмечают необходимость обратить более пристальное внимание на изучение роли фоновой электрической активности в функциональном взаимодействии корковых полей, обеспечивающих различных виды последующей деятельности, включая социальные отношения (Крижановский и др., 2009; Раро, 2013; Князев и др., 2020). Анализ фоновой ЭЭГ позволил выявить особенности преднастройки активности определенных корковых зон к последующей деятельности (Станкова, Шеповальников, 2018), которую авторы предлагают рассматривать как отражение высокой степени потенциальной готовности церебральных структур к функциональному объединению для выполнения последующих когнитивных задач. Показано, что активность мозговых структур сетей покоя может быть связана с обеспечением последующих когнитивных процессов (Sadaghiani et al., 2009, 2010; Гаврон и др., 2019).

В связи с вышеизложенным, была выдвинута рабочая гипотеза о том, что в фоновых характеристиках ЭЭГ могут быть выявлены потенциально прогностические критерии последующей успешности совместной деятельности испытуемых в диадах. Была поставлена цель исследования — провести сравнительный анализ спектральных характеристик тета- и альфа-ритмов фоновых ЭЭГ между группами испытуемых с различной результативностью последующего выполнения сенсомоторных тестов в соревновательном и кооперативном контекстах деятельности в диадах.

## МЕТОДИКА

В исследовании приняли участие 26 мужчин (19–26 лет, средний возраст  $22.5 \pm 0.6$  лет), правши. Все испытуемые подписали добровольное информированное согласие на участие в исследованиях с соблюдением всех принципов биомедицинской этики. Испытуемые приходили на обследования парами, были ранее знакомы и чаще всего обучались в одних студенческих группах. Была одна пара родных братьев. Исследование было одобрено этической комиссией ФГБНУ “НИИ нормальной физиологии им. П.К. Анохина”. В исследовании не было предусмотрено материального, денежного или иного типа вознаграждения, кроме социальной удовлетворенности и предоставления испытуемым конфиденциальной информации об индивидуальных результатах пройденных тестирований.

До начала выполнения тестовых заданий осуществлялась запись фоновых ЭЭГ испытуемых в состоянии оперативного покоя по 3 мин с открытыми глазами (ОГ1), с закрытыми глазами (ЗГ) и вновь с открытыми глазами (ОГ2). Записи ЭЭГ проводили с использованием системы “BioPack” (United States), позволяющей проводить синхронную телеметрическую регистрацию ЭЭГ испытуемых по 8 каналам с каждого, по схеме “10–20” с затылочных (O1, O2), центральных (C1, C2), лобных (F3, F4) и височных (T3, T4) отведений. В качестве референтных электродов использовались ушные (AA), а в качестве “земли” – центральное отведение Cz. Частота дискретизации составляла 1000 Гц, полоса фильтрации 4.0–45.0 Гц. Артефакты, возникающие при движении глаз или моторной деятельности, дифференцировали по их характерной форме и исключали из анализируемых записей с использованием возможностей программ AcqKnowledge 5.0 (Biopack Systems, United States) и “BRAINSYS” (ООО “Статокин”, Москва, Россия).

Спектральный анализ ЭЭГ проводили на основе быстрого преобразования Фурье (пакет программ BRAINSYS). Эпоха анализа составляла 4 секунды при длительности фрагментов 2–3 минуты. Спектральные мощности (СМ) вычисляли в диапазонах и поддиапазонах основных ритмов ЭЭГ: тета ( $\theta$  – 4–8 Гц); альфа ( $\alpha$  – 8.0–13.0 Гц,  $\alpha_1$  – 8.0–10.0 Гц,  $\alpha_2$  – 10.0–13.0 Гц). Рассчитывались относительные спектральные мощности (СМ%) как отношение абсолютной СМ колебаний в этих диапазо-

нах к суммарной мощности спектра во всей полосе пропускания программно-аппаратного обеспечения (4.0–45.0 Гц).

Для тестирования характеристик индивидуального, конкурентного и кооперативного поведения испытуемых использовался тренинг “Столбик” программно-аппаратного комплекса “БОС-Кинезис” (ООО “Нейротех”, Таганрог, Россия). Тренинг основан на биологической обратной связи (БОС) от характеристик электромиографических сигналов (ЭМГ), регистрируемых телеметрическими датчиками “Колибри” с мышц сгибателей кисти ведущей руки испытуемых. Сознательное изменение их мышечного напряжения, регистрируемое миографическими датчиками, давало возможность испытуемым управлять объектом на дисплее, практически аналогично действиям на клавиатуре или “мышью”.

При регистрации фоновых ЭЭГ и выполнении теста “Столбик” в индивидуальном контексте испытуемые располагались за отдельными, рядом расположенными столами, на которых изначально были установлены перегородки между двумя компьютерными дисплеями и стульями. Перед 3 сеансами индивидуального обучения (по 2 минуты в каждом) проводилась калибровка ЭМГ-сигнала, затем перед испытуемым ставилась задача удерживать высоту столбика в диапазоне  $50 \pm \pm 10\%$ , где за 50% принимался индивидуальный средний уровень амплитуды ЭМГ на этапе калибровки. Высота столбика динамически изменялась в зависимости от амплитуды поступающего ЭМГ-сигнала, а цвет зависел от достигаемого диапазона: зеленый – результат “Отлично” при удержании высоты в заданном диапазоне; желтый – результат “Хорошо” при высоте столбика выше или ниже на 10–30%; красный – результат “Плохо” при отклонении высоты столбика более чем на 30% от целевого уровня. В программном пакете “БОС-Кинезис” автоматически рассчитывался основной показатель результативности: процентное соотношение длительности удержания высоты столбика в целевом диапазоне “Отлично” от общего времени тренинга.

После 3 индивидуальных БОС-ЭМГ-тренингов перегородки между испытуемыми убирались и паре предлагалось выполнить то же задание в конкурентном контексте. Испытуемые садились рядом перед одним монитором компьютера, на котором в течение 3 мин одновременно предъявлялись 2 столбика,

высота и цвет которых отражали результативность БОС-ЭМГ-тренингов каждого из них. Таким образом, на этом этапе выполнения теста оба испытуемых видели динамические изменения высоты и цвета как “своего”, так и “чужого” столбиков. Перед началом этого этапа испытуемые инструктировались о соревновательном характере деятельности, который предполагал победу или проигрыш, в зависимости от того, чей % удержания высоты столбика в целевом диапазоне за время теста преобладал над этим же показателем другого.

На следующем этапе тестирования проводилось 3-минутное исследование показателей кооперативной деятельности двух испытуемых с использованием той же методики БОС-ЭМГ-тренинга. Испытуемые также располагались рядом друг с другом перед одним монитором и были проинструктированы в необходимости кооперировать свои действия для удержания в целевом диапазоне высоты ОДНОГО общего столбика, представленного в центре монитора. Его высота определялась интегральной результирующей, которая рассчитывалась из значений 2 индивидуальных ЭМГ-сигналов участников диады.

Показатели результативности соревновательного и кооперативного тренингов оценивали так же, как и при индивидуальном тестировании – по времени удержания своих столбиков в целевом диапазоне “Отлично” в % от общего времени выполнения этих заданий.

Статистическую обработку полученных данных проводили с использованием программного обеспечения STATISTICA v.12 и GraphPad PRISM v.6.01. Проверку распределения данных на нормальность проводили по трем критериям (D’Agostino–Person, Shapiro–Wilk, тест Колмогорова–Смирнова), на основе которой делали выбор об использовании параметрических или непараметрических методов статистической обработки. Достоверность различий спектральных мощностей в 8 отведениях ЭЭГ при нормальном распределении анализируемых показателей на отдельных этапах обследования (ОГ1, ЗГ или ОГ2) оценивали с помощью двухфакторного дисперсионного анализа (ANOVA) с вычислением мер размера эффектов в контексте групповых различий (partial eta squared – PES) и коррекцией множественных сравнений по методу Холма–Шидака, а при отличии распределения выборочных значений от нормального – с помощью теста Манна–Уитни (MW). Для выявления эффектов функциональной

пробы с закрыванием глаз по всей группе испытуемых и для каждой из двух групп по отдельности при нормальном распределении показателей спектральных мощностей использовали однофакторный дисперсионный анализ с коррекцией множественных сравнений по методу Тьюки для всех пар из трех состояний. При распределении показателей спектральных мощностей, отличных от нормального, с той же целью был применен непараметрический метод Фридмана (Fr) с коррекцией для множественных сравнений по методу Данна. Для отдельных сравнений между различными состояниями (ОГ1-ЗГ, ОГ2-ЗГ, ОГ1-ОГ2) был применен непараметрический метод анализа Уилкоксона (Wil) для парных сравнений по всем отведениям ЭЭГ.

Для выявления взаимосвязей спектральных мощностей ЭЭГ в отдельных отведениях с результативностью БОС-ЭМГ-тренингов были вычислены матрицы парных коэффициентов корреляции (КК) с применением параметрического или непараметрического метода корреляционного анализа, в зависимости от характера распределения данных: Пирсона или Спирмена – для нормального и ненормального распределений, соответственно. Считались значимыми КК с вероятностью  $p < 0.05$  (без поправки на множественность сравнений). Кроме того, были рассчитаны коэффициенты множественной корреляции между результативностью на отдельном этапе тренингов и совокупностью значений спектральных мощностей по всем 8 отведениям ЭЭГ с применением множественного регрессионного анализа.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

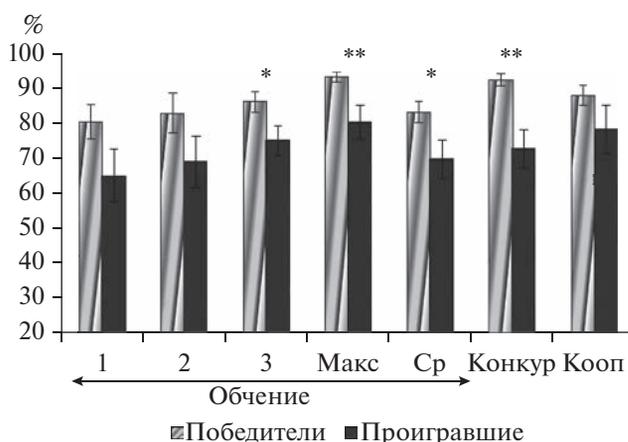
По результатам БОС-ЭМГ-тренингов испытуемые каждой диады были отнесены к одной из двух групп: “победители” или “проигравшие”, – в зависимости от того, у кого из них в паре длительности удержания столбика в диапазоне “Отлично” на этапах совместной деятельности были более чем на 2% выше или ниже, соответственно. В случае “ничьи” оба испытуемых относились к группе “победители”. Среди 13 пар юношей “ничья” была только в одной. Таким образом, было выделено две группы: “Победители” ( $n_1 = 14$ ) и “Проигравшие” ( $n_2 = 12$ ). У “победителя” в слабой паре значение результативности мог-

ло быть ниже, чем у “проигравшего” в сильной диаде.

На рис. 1 представлен график изменений результативности групп на всех этапах обследований. Выявлено, что по показателю времени удержания высоты столбика в целевом диапазоне “Отлично” в % от длительности выполнения теста результативность на третьем индивидуальном этапе обучения была достоверно выше у юношей-“победителей” ( $t(25) = 2.18, p = 0.039$ ). У “победителей” по сравнению с “проигравшими” достоверно выше были максимальное ( $t(25) = 2.81, p = 0.009$ ) и среднее ( $t(25) = 2.21, p = 0.036$ ) значения результативности за все три этапа обучения, а также была более высокой результативность при последующей конкуренции ( $t(25) = 3.85, p = 0.0008$ ).

Далее был проведен анализ различий характеристик спектральных мощностей в тета- и альфа-диапазонах частот ритма фоновых ЭЭГ в состояниях с открытыми (ОГ1, ОГ2) и закрытыми глазами (ЗГ) между двумя группами испытуемых, а также динамики изменений на этапах функциональной пробы внутри каждой из групп. Проверка нормальности распределений показателей спектральных мощностей по различным отведениям показала, что в абсолютных значениях они не соответствуют критериям нормального распределения, поэтому для межгрупповых и внутригрупповых сравнений СМ ритмов ЭЭГ были применены непараметрические статистические критерии. Значения СМ% от общего диапазона частот (4–45 Гц) были распределены нормально, что позволило применить при их анализе параметрические статистические методы.

В фоновом состоянии ОГ1 достоверных различий в значениях СМ тета-ритма между группами суммарно и по отведениям не выявлено. В состоянии с закрытыми глазами у испытуемых группы проигравших по сравнению с группой победителей были достоверно выше абсолютные значения СМ тета-ритма по всем отведениям суммарно, а также по следующим отдельным отведениям: центральным (С1, С2) и затылочным (О1, О2) в зонах обоих полушарий и в левой височной (Т3) области коры (табл. 1). На рис. 2 представлены результаты непараметрических межгрупповых и внутригрупповых парных сравнений СМ тета-ритма ЭЭГ в состояниях с открытыми (ОГ1, ОГ2) и закрытыми глаза-



**Рис. 1.** Результативность БОС-ЭМГ-тренингов в группах “победителей” и “проигравших” юношей – % времени удержания высоты “столбика” на целевом уровне “Отлично” от общей длительности тренингов на этапах обследований: 1, 2 и 3 – сеансы обучения, “Макс” – максимальное значение из 3-х сеансов обучения, “Ср” – среднее значение за эти сеансы обучения, “Конкур” – выполнение тренинга в контексте конкуренции в паре, “Кооп” – кооперативное выполнение тренинга в диаде с обратной связью от индивидуальных действий. \* – достоверность различий  $p < 0.05$ ; \*\* – достоверность различий  $p < 0.01$ .

**Fig. 1.** The effectiveness of BFB-EMG trainings for groups of “winners” and “losers”. On the ordinate axis – % of the time the “column” height is kept at the target level “Excellent” from the total duration of trainings. 1, 2 and 3 – training sessions, “Макс” – the maximum value for 1–3 training sessions, “Ср” – the average value for 1–3 training sessions, “Конкур” – training in the competition context in a pair, “Кооп” – cooperative context of training with feedback from individual actions. \* – reliability of differences  $p < 0.05$ ; \*\* – reliability of differences  $p < 0.01$ .

ми (ЗГ) у испытуемых групп победителей и проигравших.

Однофакторный дисперсионный анализ динамики показателей СМ тета-ритма ЭЭГ в последовательных трех состояниях (ОГ1, ЗГ, ОГ2) продемонстрировал достоверные изменения в каждой из двух групп испытуемых. У испытуемых группы победителей суммарный эффект изменений на этапах функциональной пробы (ОГ1-ЗГ-ОГ2) СМ тета-ритма был достоверен согласно непараметрическому сравнению по тесту Фридмана ( $Fg = 16.00, p < 0.0001$ ). Множественные (с коррекцией по методу Данна) и парные (по тесту Уилкоксона) сравнения выявили достоверное более низкие СМ тета-ритма по всем отведениям

**Таблица 1.** Результаты статистического непараметрического межгруппового анализа различий спектральных мощностей в тета ( $\theta$  4–8 Гц) и альфа2 ( $\alpha_2$  10–13 Гц) диапазонах частот ЭЭГ у испытуемых групп “Победителей” и “Проигравших” в состоянии оперативного покоя с закрытыми глазами. Представлены значения медианы и квартили (Q25% и Q75%) суммарно по всем и отдельным отведениям. \* –  $p < 0.1$ ; \*\* –  $p < 0.05$ ; \*\*\* –  $p < 0.01$

**Table 1.** The results of statistical nonparametric intergroup analysis of differences in spectral powers in theta ( $\theta$  4–8 Hz) and alpha 2 ( $\alpha_2$  10–13 Hz) EEG frequency ranges in subjects of “Winners” and “Losers” groups in a state of operative rest with closed eyes. The median and quartile (Q25% and Q75%) in total for all and individual areas of the cortex are presented. \* –  $p < 0.1$ ; \*\* –  $p < 0.05$ ; \*\*\* –  $p < 0.01$

Ритм ЭЭГ	Отв.	СМ Медиана (Q25%; Q75%) в группах		Критерии по методу Манна–Уитни		
		победители ( $n = 14$ )	проигравшие ( $n = 12$ )	Z	U	p
$\theta$	По всем	16.89 (12.04; 35.18)	37.35 (20.87; 52.78)	–1.78	53	0.074 *
	F3	26.95 (14.53; 43.20)	35.09 (17.38; 57.53)	–1.39	61	0.167 –
	F4	20.77 (14.71; 45.53)	36.98 (20.83; 55.66)	–1.05	68	0.300 –
	C3	13.79 (10.37; 22.94)	31.51 (22.63; 49.31)	–1.78	53	0.075 *
	C4	10.80 (8.97; 32.21)	32.35 (21.95; 40.98)	–2.17	45	0.028 **
	T3	19.39 (13.54; 29.05)	36.93 (22.18; 40.05)	–1.83	52	0.067 *
	T4	14.55 (12.15; 30.45)	21.14 (14.16; 46.85)	–1.15	66	0.256 –
	O1	13.61 (9.06; 28.52)	42.32 (15.17; 58.47)	–2.42	40	0.014 **
	O2	13.87 (10.17; 28.59)	43.61 (20.25; 61.00)	–2.42	40	0.014 **
$\alpha_2$	По всем	57.17 (30.21; 86.50)	37.94 (26.82; 58.51)	3.11	32	<0.001 ***
	F3	52.37 (30.42; 84.92)	33.34 (23.85; 55.54)	1.561	56	0.098 *
	F4	54.85 (32.76; 82.02)	33.20 (25.49; 50.52)	1.757	54	0.079 *
	C3	56.12 (33.76; 88.28)	42.57 (30.97; 66.02)	0.634	77	0.526 –
	C4	62.60 (20.36; 87.06)	37.56 (25.07; 59.56)	1.683	55	0.088 *
	T3	56.01 (28.96; 85.82)	34.47 (21.80; 49.95)	1.757	54	0.079 *
	T4	49.05 (22.99; 68.36)	35.18 (20.19; 44.06)	1.415	61	0.157 –
	O1	65.83 (30.14; 90.58)	51.09 (36.87; 83.73)	0.195	86	0.845 –
	O2	64.53 (30.73; 98.22)	56.38 (35.49; 82.58)	0.514	74	0.607 –

суммарно в состоянии ЗГ по сравнению с ОГ1 и с ОГ2 ( $Wil = -36$ ;  $p = 0.0078$ , в обоих сравнениях).

Результаты ANOVA СМ% тета-ритма в группе победителей выявили значимые эффекты следующих факторов, характеризующие высокими величинами PES: этапов функциональной пробы ( $F(2, 26) = 25.85$ ,  $p < 0.0001$ ,  $PES = 0.767$ ), отведений ( $F(7, 91) = 6.69$ ,  $p < 0.0001$ ,  $PES = 0.577$ ) и их взаимодействия ( $F(14, 182) = 3.129$ ,  $p = 0.0002$ ,  $PES = 0.194$ ). Множественные парные сравнения (с поправкой по методу Тьюки) выявили у группы победителей достоверное снижение между состоянием ЗГ и обоими этапами с открытыми глазами (ОГ1 и ОГ2,  $p < 0.0001$ ). Дальнейшие множественные сравнения по отведениям ЭЭГ в трех состояниях показали достоверные ( $p < 0.05$ ) снижения СМ% тета-

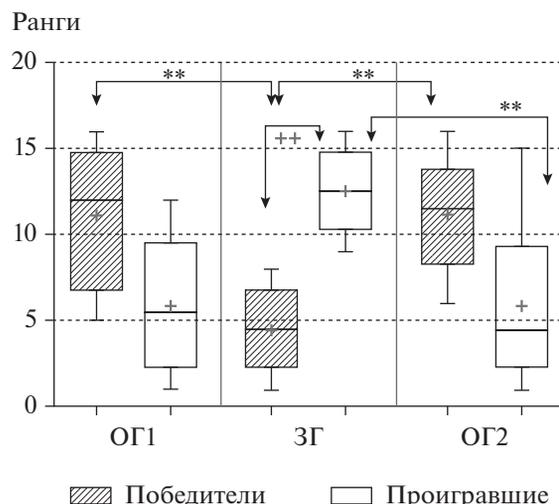
ритма в обеих фронтальных (F3; F4), правой центральной (C4), левой височной (T3) и затылочной (O1) областях. В этой группе не выявлено различий между двумя этапами с открытыми глазами (ОГ1–ОГ2). Следовательно, в группе победителей, после значительного снижения показателей спектральных мощностей тета-ритма в большинстве отведений в состоянии с закрытыми глазами относительно ОГ1, при ОГ2 они вновь возросли до первоначальных уровней.

Непараметрический анализ (по методу Фридмана) динамики изменений значений абсолютных СМ тета-ритма у испытуемых группы проигравших выявил достоверность различий между тремя этапами функциональной пробы ОГ1, ЗГ и ОГ2 ( $F_r = 10.75$ ,  $p = 0.0024$ ). Парные различия не наблюдались между ОГ1 и ЗГ, но обнаружено достоверное

снижение СМ тета-ритма при ОГ2 относительно ЗГ (Wil  $p = 0.0234$ ) и ОГ1 (Wil  $p = 0.0078$ ). Дисперсионный ANOVA СМ% тета-ритма у испытуемых группы проигравших выявил суммарное и с высокой мощностью эффектов достоверное влияние факторов этапов ( $F(2, 22) = 10.22, p = 0.0007, PES = 0.552$ ), отведений ( $F(7, 77) = 4.231; p = 0.0005, PES = 0.560$ ) и их взаимодействие ( $F(14, 154) = 5.774, p < 0.0001, PES = 0.344$ ). Парные множественные сравнения показали достоверно меньшие значения СМ% тета-ритма при ЗГ относительно ОГ2 ( $t(11) = 3.406; p = 0.0059$ ). Достоверное ( $p < 0.05$ ) снижение СМ% тета-ритма ЭЭГ в состоянии ЗГ по сравнению с ОГ1 и ОГ2 обнаружено в зрительных (О1, О2) и фронтальных (F3, F4) отведениях обоих полушарий. Таким образом, у испытуемых группы проигравших наблюдались иная динамика и менее значимые изменения СМ тета-ритма ЭЭГ на этапах функциональной пробы с закрыванием глаз.

Уровни СМ всего диапазона альфа-ритма ЭЭГ у испытуемых группы победителей были достоверно выше, чем в группе проигравших, суммарно по всем отведениям на трех этапах функциональной пробы: ОГ1 ( $U(MW) = 5; p = 0.003$ ), ЗГ ( $U(MW) = 11; p = 0.028$ ) и ОГ2 ( $U(MW) = 4; p = 0.002$ ). Множественные сравнения СМ% всего диапазона альфа-ритма ЭЭГ в состоянии покоя с закрытыми глазами по отведениям (с коррекцией по методу Холма–Шидака) выявило, что достоверно выше значения у юношей группы “победителей” по сравнению с “проигравшими”, в височных областях (Т3:  $t(25) = 2.14, p = 0.042$ ; Т4:  $t(25) = 2.19, p = 0.038$ ) и в правых центральной (С4:  $t(25) = 2.49, p = 0.019$ ) и затылочной (О2:  $t(25) = 1.73, p = 0.091$ ) зонах коры.

Далее был проведен межгрупповой и внутригрупповой анализ СМ отдельно в поддиапазонах 1 (8–10 Гц) и 2 (10–13 Гц) альфа-ритма на трех этапах функциональной пробы. Значения СМ альфа1-ритма суммарно и по отведениям достоверно не различались между группами испытуемых победителей и проигравших на этапах обследований. Согласно однофакторному анализу по методу Фридмана, в обеих группах достоверны изменения между этапами функциональной пробы ОГ1–ЗГ–ОГ2 ( $p < 0.0001, Fr = 14.25$  и  $Fr = 16.00$  в группах победителей и проигравших, соответственно). Однако выявились различные динамики изменений СМ альфа1-ритма в этих группах. У испытуемых группы победи-

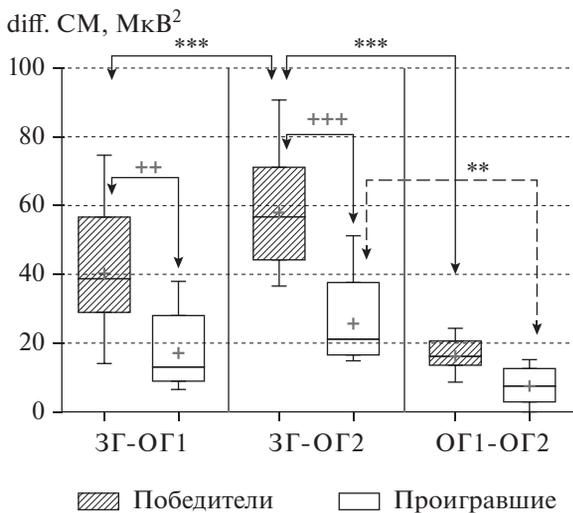


**Рис. 2.** Результаты межгруппового и внутригруппового анализа различий рангов спектральных мощностей тета-ритма ЭЭГ (4–8 Гц) на этапах с открытыми (ОГ1, ОГ2) и закрытыми глазами (ЗГ) у испытуемых групп победителей и проигравших. Границы боксов соответствуют квартилям Q25% и Q75%. Линии внутри бокса – медианы, точки в боксе – средние, верхнее и нижнее отклонения – максимальные и минимальные значения. ++ – достоверность ( $p < 0.05$ ) межгрупповых различий по методу Манна–Уитни; \*\* – достоверность ( $p < 0.05$ ) внутригрупповых парных отличий по методу Уилкоксона.

**Fig. 2.** The results of the intergroup and intragroup analysis of the differences in the spectral powers of the theta rhythm of the EEG (4–8 Hz) at the stages with open (OG1, OG2) and closed eyes (ZG) in the groups of winners and losers. The boundaries of the boxes correspond to the quartiles Q25% and Q75%. The lines inside the box are the medians, the points in the box are the averages, the upper and lower deviations are the maximum and minimum values. The reliability of intergroup difference according to the Mann–Whitney method: ++ –  $p < 0.05$ ; the reliability of intra-group paired differences according to the Wilcoxon method: \*\* –  $p < 0.05$ .

телей СМ альфа1 достоверно снижалась только на этапе ОГ2, по сравнению с ЗГ (Wil = –36,  $p = 0.0078$ ). У испытуемых группы проигравших увеличение СМ альфа1 было достоверно выше на этапе ЗГ по сравнению с ОГ1 и ОГ2 (Wil = –32,  $p = 0.008$ , при обоих парных сравнениях).

Обнаружены межгрупповые различия СМ в альфа2-диапазоне ЭЭГ, которые выразились в достоверно больших значениях у испытуемых группы победителей по сравнению с проигравшими при ЗГ во фронтальных (F3, F4), правой центральной (С4) и левой височной (Т3) зонах коры (табл. 1). Повышение



**Рис. 3.** Относительные суммарные различия спектральных мощностей альфа2-ритма ЭЭГ между этапами функциональной пробы с открытыми (ОГ1, ОГ2) и закрытыми глазами (3Г) у групп победителей и проигравших. Границы боксов соответствуют квартилям Q25% и Q75%. Линия внутри бокса – медиана, точка в боксе – среднее, верхнее и нижнее отклонения – максимальное и минимальное значения соответственно. Достоверности внутригрупповых парных различий между этапами по методу Уилкоксона: \*\* –  $p < 0.05$ , \*\*\* –  $p < 0.01$ . Достоверности межгрупповых различий на отдельных этапах по методу Манна–Уитни: ++ –  $p < 0.05$ , +++ –  $p < 0.01$ .

**Fig. 3.** The relative total differences in the spectral powers of the alpha-2 EEG rhythm between the stages of the functional test with open (OG1, OG2) and closed eyes (3Г) in the groups of winners and losers. The boundaries of the boxes correspond to the quartiles Q25% and Q75%. The line inside the box is the median, the point in the box is the average, the upper and lower deviations are the maximum and minimum values, respectively. The reliability of intra-group paired differences between stages according to the Wilcoxon method: \*\* –  $p < 0.05$ , \*\*\* –  $p < 0.01$ . The reliability of intergroup differences at individual stages according to the Mann–Whitney method: ++ –  $p < 0.05$ , +++ –  $p < 0.01$ .

значений СМ альфа2-ритма в состоянии 3Г относительно ОГ1 и ОГ2 у испытуемых-победителей достоверно и почти в два раза превышал его рост у проигравших испытуемых, суммарно по всем отведениям ( $U(MW) = 11$ ;  $p = 0.028$ ) (рис. 3). Результаты однофакторного анализа по Фридману свидетельствуют о достоверных различиях СМ альфа2-ритма между этапами функциональной пробы в обеих группах (у победителей:  $Fr = 10.8$ ,  $p = 0.0045$ ; у проигравших:  $Fr = 10.5$ ,  $p = 0.0052$ ). В группе победителей при множе-

ственных парных сравнениях (с коррекцией по методу Данна) выявлена достоверная разница между состоянием 3Г и ОГ2 ( $p = 0.0031$ ), а у проигравших – между 3Г и ОГ1 ( $p = 0.043$ ), 3Г и ОГ2 ( $p = 0.0066$ ). Таким образом, анализ показателей СМ альфа2-ритма ЭЭГ в двух группах на этапах функциональной пробы с закрыванием и открыванием глаз показал, что в группе победителей более выражен рост его мощности при 3Г относительно этапов ОГ, по сравнению с испытуемыми из проигравшей группы. В большей степени межгрупповые различия в увеличении альфа2-активности при закрывании глаз характерны для фронтальных и височных зон коры.

Далее нами был проведен корреляционный анализ взаимосвязей показателей результативности БОС-ЭМГ-тренингов с показателями СМ тета- и альфа-ритмов ЭЭГ, результаты которого приведены в таблицах 2 и 3 соответственно. Обнаружено, что все коэффициенты корреляции (КК) между характеристиками СМ% тета-ритма отдельных отведений и результативностью испытуемых при выполнении тренингов в различных социальных контекстах отрицательные. Следовательно, чем выше были СМ% тета-ритма фоновых ЭЭГ у испытуемых в состоянии покоя с закрытыми глазами, тем ниже у них показатели результативности при последующих БОС-ЭМГ-тренингах. Достоверные множественные корреляции между совокупностями показателей СМ тета-ритма всех 8 отведений выявлены с результативностями при 2-м и 3-м индивидуальном БОС-ЭМГ-тренингах, их максимальным и средними значениями за все три этапа индивидуального обучения, а также с результативностью при кооперации. Всего достоверных парных корреляционных связей по данным таблицы 2 обнаружено 31. Из них наибольшее количество достоверных коэффициентов корреляций выявлено для показателей средней ( $n = 7$ ) и максимума ( $n = 6$ ) результативности при обучении. По отведениям ЭЭГ максимальное число достоверных корреляционных связей обнаружено для левой затылочной зоны ( $n = 6$ ), для левых лобных и височных (по  $n = 5$ ). Обращает на себя внимание преобладание достоверных корреляционных связей результативности с тета-активностью левополушарных зон над правополушарными, по суммарному соотношению равное 20 : 11.

Успешность БОС-ЭМГ-тренинга при конкуренции имела 4 отрицательные корре-

**Таблица 2.** Корреляционная матрица взаимосвязей между относительной спектральной мощностью тета-ритма фоновых ЭЭГ в состоянии с закрытыми глазами у всех испытуемых юношей и показателями их результативности при выполнении БОС-ЭМГ-тренингов при индивидуальном обучении, конкуренции и кооперации. Представлены значения достоверных парных коэффициентов корреляции по Пирсону ( $p < 0.05$ , без поправки на множественность сравнений), множественные коэффициенты корреляции (МнКК) и уровни их значимости ( $p$ ). В нижней строке и правом столбце показано суммарное количество (СК) выявленных достоверных парных коэффициентов корреляции по столбцам (отведения ЭЭГ) и строкам (показатели результативности) соответственно

Этапы БОС-ЭМГ-тренингов	Отведения								Мн. КК	СК
	F3	F4	C3	C4	T3	T4	O1	O2		
Индивидуальное обучение 1	-0.424 $p = 0.039$	—	—	—	-0.512 $p = 0.011$	—	-0.488 $p = 0.015$	-0.462 $p = 0.023$	—	4
Индивидуальное обучение 2	—	—	-0.474 $p = 0.019$	-0.419 $p = 0.042$	—	—	-0.477 $p = 0.018$	-0.500 $p = 0.013$	0.722 $p = 0.067$	4
Индивидуальное обучение 3	—	-0.431 $p = 0.036$	—	—	—	—	—	—	0.729 $p = 0.058$	1
Максимум при обучении	-0.444 $p = 0.030$	-0.441 $p = 0.031$	-0.451 $p = 0.027$	-0.405 $p = 0.049$	-0.499 $p = 0.013$	—	-0.476 $p = 0.019$	—	0.760 $p = 0.030$	6
Среднее при обучении	-0.441 $p = 0.031$	-0.436 $p = 0.033$	-0.452 $p = 0.027$	-0.443 $p = 0.030$	-0.538 $p = 0.007$	—	-0.548 $p = 0.006$	-0.526 $p = 0.008$	0.726 $p = 0.064$	7
Конкуренция	-0.417 $p = 0.043$	—	—	—	-0.614 $p = 0.001$	—	-0.482 $p = 0.017$	-0.416 $p = 0.043$	—	4
Кооперация	-0.529 $p = 0.008$	-0.531 $p = 0.008$	-0.412 $p = 0.045$	—	-0.655 $p = 0.001$	—	-0.492 $p = 0.015$	—	0.770 $p = 0.020$	5
Суммарное количество (СК)	5	4	4	3	5	0	6	4	(5)	31

ляционные связи со СМ% тета-ритма в состоянии с закрытыми глазами в затылочных зонах коры обоих полушарий, в левых фронтальной и височной областях. Результативность в условиях кооперации отрицательно коррелировала со СМ% тета-ритма большинства отведений (6 из 8), кроме правых височной и центральной.

Таким образом, можно сделать заключение, что высокий уровень спектральной мощности тета-ритма фоновой ЭЭГ и его незначительное снижение в состоянии с закрытыми глазами могут являться отрицательно-взаимосвязанными прогностическими критериями результативности последующего сенсомоторного индивидуального обучения, а также более низкой успешности при конкуренции и кооперации юношей в диадах.

Результаты корреляционного анализа взаимосвязей между СМ% альфа-ритма ЭЭГ с

ЗГ в различных отведениях и результативностью БОС-ЭМГ-тренингов в индивидуальном и совместном контекстах деятельности приведены в таблице 3. Число достоверных КК ( $n = 13$ ) между результативностью и спектральной мощностью альфа-ритма ЭЭГ с ЗГ меньше количества вышеописанных коэффициентов корреляции с тета-ритмом в том же состоянии (табл. 2). Они все положительные и относятся к взаимосвязям между СМ% альфа-ритма в височных (Т3, Т4) и затылочных (О1, О2) отведениях и результативностью индивидуального выполнения 1–2 БОС-ЭМГ-тренингов, что отражается также на достоверных корреляционных взаимосвязях со средней и максимальной результативностью за все три тренинга на этапе обучения. Не обнаружено достоверных корреляционных связей между показателями СМ% альфа-ритма ЭЭГ с ЗГ и результативностью

**Таблица 3.** Корреляционная матрица взаимосвязей между относительной спектральной мощностью альфа-ритма ЭЭГ в состоянии с закрытыми глазами у всех испытуемых юношей и показателями результативности при выполнении БОС-ЭМГ-тренингов при индивидуальном обучении, конкуренции и кооперации. Форма и обозначения как в табл. 2

**Table 3.** Correlation matrix of relationships between the relative spectral power of the alpha rhythm of the EEG in the state with closed eyes in all the young men tested and their performance indicators when performing BOS-EMG trainings in individual training, competition and cooperation. The form of the content and notation as in Table 2

Этапы БОС-ЭМГ-тренингов	Отведения								Мн. КК	СК
	F3	F4	C3	C4	T3	T4	O1	O2		
Индивидуальное обучение 1	–	–	–	–	–	0.406 <i>p</i> = 0.049	0.4098 <i>p</i> = 0.047	–	–	2
Индивидуальное обучение 2	–	–	–	–	–	0.412 <i>p</i> = 0.045	0.595 <i>p</i> = 0.002	0.501 <i>p</i> = 0.013	–	3
Индивидуальное обучение 3	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0
Максимум при обучении	–	–	–	–	0.411 <i>p</i> = 0.046	0.472 <i>p</i> = 0.020	–	–	–	2
Среднее при обучении	–	–	–	–	0.433 <i>p</i> = 0.035	0.479 <i>p</i> = 0.018	0.514 <i>p</i> = 0.010	0.461 <i>p</i> = 0.023	–	4
Конкуренция	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0
Кооперация	–	–	–	–	0.4126 <i>p</i> = 0.045	0.4782 <i>p</i> = 0.018	–	–	0.743 <i>p</i> = 0.044	2
Суммарное количество связей (СК)	0	0	0	0	3	5	3	2	(1)	13

испытуемых при конкуренции в диадах. Значения СМ% альфа-ритма ЭЭГ в фоновом состоянии с закрытыми глазами в височных (Т3, Т4) зонах коры достоверно положительно коррелировали с результативностью БОС-ЭМГ-тренинга в условии кооперативных действий испытуемых в паре. При этом выявлена достоверная множественная корреляция результативности при кооперации с совокупностью спектральных мощностей всех отведений. Асимметрия количества достоверных КК между СМ% альфа-ритма право- и левополушарных отведений и результативностью не выявлена. Таким образом, бо́льшая активация альфа-ритма ЭЭГ в состоянии с закрытыми глазами в височных и затылочных областях коры была взаимосвязана с более высокой последующей результативностью БОС-ЭМГ-тренингов при обучении и совместной кооперативной, но не конкурентной деятельности.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты проведенного исследования свидетельствуют о том, что у группы победителей снижение тета-ритма ЭЭГ в состоянии с

закрытыми глазами существенно выраженнее, чем в группе проигравших, в большинстве зарегистрированных областей коры. У испытуемых из группы проигравших в состоянии с закрытыми глазами остаются на достаточно высоких уровнях спектральные мощности тета-ритма ЭЭГ во фронтальных, височных и центральных зонах коры.

Полученные нами данные сопоставимы с результатами ряда исследований, в частности с работой Станковой и Шеповальникова (2018), в которой выявлено, что спектральная мощность и индекс колебаний  $\alpha$ - и  $\theta$ -диапазона в левом средневисочном отведении ЭЭГ коррелировали с точностью последующего выполнения “Корректирующей пробы Бурдона”. Увеличение спектральной мощности  $\theta$ -диапазона, наряду со снижением  $\alpha$ -индекса ЭЭГ, приводило к возрастанию количества ошибок, допущенных при выполнении этого теста. Аналогичные результаты получены в исследовании взаимосвязей ритмов ЭЭГ в состоянии покоя с показателями результативности выполнения задания go/no-go, в котором испытуемым необходимо было реагировать на один стимул, подавляя ответ на другой. В част-

ности, выявлена противоположная связь мощности тета-ритма ЭЭГ с точностью деятельности (Karatasoska et al., 2018).

Результаты проведенного исследования свидетельствуют о том, что более высокие уровни спектральной мощности альфа-ритма фоновой ЭЭГ в состоянии покоя с закрытыми глазами, особенно в альфа2-поддиапазоне частот (10–13 Гц), характерны для группы испытуемых с высокой результативностью последующей индивидуальной, соревновательной и кооперативной совместной деятельности. Полученные данные схожи с результатами ряда работ, в которых показана положительная связь между усилением спектральной мощности альфа-ритма ЭЭГ в состоянии покоя и эффективностью выполнения последующих задач. В исследовании Коробейниковой И.И. с соавторами (Коробейникова и др., 2021) показано, что СМ альфа-ритма в фоновых состояниях с закрытыми и открытыми глазами были выше у группы испытуемых с последующей высокой результативностью выполнения задачи “n-back”. Кроме того, в этой же работе продемонстрировано, что фотостимуляция с частотой 10 Гц альфа-диапазона оказывает положительное воздействие на успешность деятельности испытуемых с исходно более низкими уровнями результативности и спектральной мощности альфа-ритма ЭЭГ. В другом исследовании также обнаружены положительные корреляции между увеличением альфа-мощности в диапазоне 9.5–10.5 Гц с параллельным снижением мощности дельта-тета-ритмов (0.5–5 Гц) и укорочением времени реакции, меньшим количеством ошибок при обнаружении стимулов (Lockley et al., 2006). Обнаружены взаимосвязи характеристик альфа-ритма ЭЭГ в состоянии покоя, особенно в высокочастотном альфа2-диапазоне ЭЭГ, с когнитивными способностями испытуемых, в частности с характеристиками рабочей, кратковременной или долговременной памяти (Prat et al., 2016; Mahjoory et al., 2019). Показано, что мощности различных диапазонов ЭЭГ в покое могут быть предикторами последующих когнитивных функций, в частности, выявлена положительная корреляция мощности альфа2-диапазона ритма ЭЭГ с показателями эпизодической памяти, ассоциативного обучения и скорости обработки информации, в отличие от отрицательных связей мощности альфа1-диапазона у людей с психическими расстройствами (Sargent

et al., 2021). Более конкретные взаимосвязи различных поддиапазонов альфа-ритма ЭЭГ в состоянии покоя выявлены Крижановским с соавторами (2009): при выполнении сенсорных заданий результативность была связана с высоким уровнем  $\alpha$ 2-активности в полосе частот 11.52–12.11 Гц в левом теменном и правых теменном, затылочном и височном отведениях; а успешность и сенсомоторного, и мнемонического тестов коррелировала с мощностью альфа-колебаний ЭЭГ в диапазоне 9.5–10.5 Гц в левом лобном отведении.

Считается, что для достижения успешности при социальных конкурентных взаимодействиях большую роль играют личностные характеристики, отражающие соотношение между поведенческими системами активации (BAS – Behavioral Activation System) и торможения (BIS – Behavioral Inhibition System) (Balconi, Pagani 2014). Согласно теории систем активации/торможения поведения, у людей может преобладать одна из них: либо стремление к избеганию неудач (BIS), либо направленность индивида на получение вознаграждения – BAS (Carver, White, 1994). Обнаружено, что при выполнении диадических соревновательных тестов для участников с более высоким уровнем показателей поведенческой активации BAS в большей степени было характерно увеличение альфа-активности в левой префронтальной области, а также более высокие показатели рангового восприятия и последующей соревновательной результативности (Balconi, Vanutelli, 2016).

Обосновано представление о том, что более высокая альфа-активность ЭЭГ означает большую готовность альфа-системы к обработке информации, не являясь лишь маркером когнитивной инактивности или торможения внимания и областей коры, не относящихся к задаче (Knyazev et al., 2006). Это мнение подтверждено в исследовании с одновременной регистрацией электроэнцефалограмм и фМРТ-активности мозговых структур испытуемых в состоянии покоя (Sadaghiani et al., 2010). В этой работе выявлено, что активность цингулоинсулярно-таламической сети, включающей дорсальную переднюю поясную извилину, передний островок, переднюю префронтальную кору и таламус, положительно коррелирует с глобальной мощностью высокочастотного (10–12 Гц) альфа2-диапазона ЭЭГ. При этом мощность этого диапазона отрицательно коррелировала с

активностью структур дорсальной сети внимания. Sadaghiani с соавт. (2010) полагают, что активность цингулоинсулярно-таламической сети, посредством реверберации альфа-осцилляций, поддерживает состояние тонической “бдительности”, неизбирательной готовности к восприятию и действиям. Ранее было показано, что активность этой сети способствует улучшению выполнения перцептивных задач и ее активность в предстимульные периоды является прогностическим признаком результативности (Sadaghiani et al., 2009).

В проведенном нами исследовании обращает на себя внимание тот факт, что число достоверных межгрупповых различий и корреляционных связей с результативностью значительно более выражено для тета-ритма ЭЭГ. Различия тета-ритма между победителями и проигравшими генерализованы по большинству зарегистрированных отведений. Достоверные корреляционные связи тета-ритма ЭЭГ с результативностью асимметричны, с 2-кратным преобладанием их числа для зон коры левого полушария над правым. Тогда как достоверные корреляционные взаимосвязи мощности альфа-ритма с результативностью выявлены в симметричных височных и зрительных областях коры.

Показано, что межполушарная фронтальная асимметрия и спектральные мощности по срединному отведению тета- и альфа-ритмов ЭЭГ могут с высокой вероятностью дифференцировать валентность, силу и специфику эмоциональных возбуждений (Balconi, Mazza, 2010; Zhao et al., 2018; Cao et al., 2020). Правостороннее усиление фронтальной альфа-активности было характерно для отрицательно окрашенных эмоций, а левостороннее — для положительных (Balconi, Mazza 2010). В этом же исследовании у участников с более высокими показателями системы поведенческого торможения (BIS) была большая альфа-активация правого полушария при отрицательных эмоциях, а у испытуемых с характеристиками системы поведенческой активации (BAS) была более выраженной левосторонняя активация при положительных эмоциях.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Совокупность результатов проведенного нами исследования свидетельствуют о том, что показатели спектральной мощности тета- и альфа-ритмов ЭЭГ в состоянии покоя при функциональной пробе с закрыванием глаз

различаются у групп испытуемых, которые в дальнейшем при совместной деятельности демонстрировали разную результативность выполнения тренингов в соревновательном и кооперативном контекстах в диадах. Испытуемые с высокой мощностью альфа2-ритма и с низкой мощностью тета-ритма ЭЭГ в состоянии покоя с закрытыми глазами в последующем демонстрировали более высокую результативность БОС-ЭМГ-тренингов как в индивидуальном, так и в соревновательном контексте деятельности по сравнению с индивидуальными, у которых в пробе с закрыванием глаз незначительно снижались спектральные мощности тета-ритма и невыраженно увеличивалась альфа-активность. Показатели фоновых значений спектральной мощности тета-ритма ЭЭГ, особенно зон коры левого полушария, коррелировали с показателями результативности выполнения сенсомоторных тренингов в индивидуальном и совместном контекстах деятельности.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Н.Ю. Трифоновой, И.С. Буяновой за помощь в проведении исследования и О.В. Сергиенко за помощь в рекрутировании испытуемых.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гаврон А.А., Araujo Ya.I.D., Шарова Е.В. Смирнов А.С., Князев Г.Г., Челябинна М.В., Фадеева Л.М., Абдулаев А.А., Куликов М.А., Жаворонкова Л.А., Болдырева Г.Н., Верхлютов В.М., Пронин И.Н. Групповой и индивидуальный фМРТ-анализ основных сетей покоя здоровых испытуемых. Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова. 2019. 69 (2): 150–163.
- Князев Г.Г., Бочаров А.В., Митрофанова Л.Г., Слободской-Плюснин Я.Ю., Пылкова Л.В. ЭЭГ-корреляты агрессивности и тревожности в модели социальных взаимодействий. Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова. 2011. 61 (6): 716–723.
- Князев Г.Г., Бочаров А.В., Савостьянов А.Н., Левин Е.А. ЭЭГ-корреляты активности дефолт-системы при обработке социально значимой информации. Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова. 2020. 70 (2): 174–181.
- Коробейникова И.И., Каратыгин Н.А., Венерина Я.А. Спектральные характеристики альфа-ритма ЭЭГ при различной успешности достижения результата теста “n-back” у человека в обычных условиях и при ритмически организован-

- ной оптической стимуляции с частотой 10 Гц. Психическое здоровье. 2021. 16 (1): 3–11.
- Крижановский С.А., Зима И.Г., Тукаев С.В., Чернинский А.А.* Взаимосвязь эффективности деятельности человека с ЭЭГ-характеристиками его исходного состояния покоя. Ученые записки Таврического национального университета имени В.И. Вернадского. Серия: Биология Химия. 2009. 22 (61) (1): 50–58.
- Муртазина Е.П., Матюлько И.С., Журавлев Б.В.* Система поведенческого доминирования: Обзор психофизиологических особенностей и нейробиологических маркеров. Журн. мед.-биол. исследований. 2020. 8 (4): 409–418.
- Павленко В.Б., Аликина М.А., Махин С.А.* Взаимосвязь уровней общего и эмоционального интеллекта с амплитудой альфа- и бета-ритмов ЭЭГ покоя. Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Биология. Химия. 2018. 4 (70) (3): 134–142.
- Станкова Е.П., Шеповальников А.Н.* Функциональное объединение корковых полей в покое как механизм преднастройки мозга к целенаправленной деятельности. Физиология человека. 2018. 44 (6): 5–14.
- 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.
- Babiloni C., Percio C.D., Vecchio F., Sebastiano F., Di Gennaro G., Quarato P.P., Morace R, Pavone L., Soricelli A., Noce G., Esposito V., Rossini P.M., Gallesse V., Mirabella G.* Alpha, beta and gamma electrocorticographic rhythms in somatosensory, motor, premotor and prefrontal cortical areas differ in movement execution and observation in humans. Clinical Neurophysiology. 2016. 127 (1): 641–654.
- Balconi M., Mazza G.* Lateralisation effect in comprehension of emotional facial expression: a comparison between EEG alpha band power and behavioural inhibition (BIS) and activation (BAS) systems. Laterality. 2010; 15 (3): 361–84.
- Balconi M., Pagani S.* Personality correlates (BAS-BIS), self-perception of social ranking, and cortical (alpha frequency band) modulation in peer-group comparison. Physiol. Behav. 2014. 133: 207–215.
- Balconi M., Grippa E., Vanutelli M.E.* What hemodynamic (fNIRS), electrophysiological (EEG) and autonomic integrated measures can tell us about emotional processing. Brain Cogn. 2015. 95: 67–76.
- Balconi M., Vanutelli M.E.* Competition in the Brain. The Contribution of EEG and fNIRS Modulation and Personality Effects in Social Ranking. Front. Psychol. 2016. 7. 1587.
- Balconi M., Vanutelli M.E.* Empathy in Negative and Positive Interpersonal Interactions. What is the Relationship Between Central (EEG, fNIRS) and Peripheral (Autonomic) Neurophysiological Responses. 2017. Advances in cognitive psychology, 13 (1). 105–120.
- Balconi M., Vanutelli M.E.* Functional EEG connectivity during competition. BMC Neuroscience, 2018. 19: 63.
- Cao R., Shi H., Wang X., Huo S., Hao Y., Wang B., Guo H., Xiang J.* Hemispheric Asymmetry of Functional Brain Networks under Different Emotions Using EEG Data. Entropy (Basel). 2020. 22 (9): 939.
- Carver C.S., White T.L.* Behavioral Inhibition, Behavioral Activation and Affective Responses to Impending Reward and Punishment: The BIS/BAS Scales. J. Pers. Soc. Psychol. 1994. 67 (2): 319–333.
- Coomans E., Geraedts I., Keeser D., Pogarell O., Engelbrecht H.* Intersubject EEG Coherence in Healthy Dyads During Individual and Joint Mindful Breathing Exercise: An EEG-Based Experimental Hyperscanning Study. Advances in Cognitive Psychology, 2021. 17: 250–260.
- Drigas A.S., Papoutsis C.* A New Layered Model on Emotional Intelligence. Behav Sci (Basel). 2018. 8(5): 45.
- Fox N.A., Bakermans-Kranenburg M.J., Yoo K.H., Bowman L.C. Cannon E.N., Vanderwert R.E., Ferrari P.F., van IJzendoorn M.H.* Assessing human mirror activity with EEG mu rhythm: A meta-analysis. Psychol Bull. 2016. 142 (3): 291–313.
- Karamacoska D., Barry R.J., Steiner G.Z.* Electrophysiological underpinnings of response variability in the Go/NoGo task. International Journal of Psychophysiology. 2018. 134: 159–167.
- Klados M.A., Konstantinidi P., Dacosta-Aguayo R., Kostaridou V.D., Vinciarelli A., Zervakis M.* Automatic Recognition of Personality Profiles Using EEG Functional Connectivity During Emotional Processing. Brain sciences, 2020. 10 (5): 278.
- Knyazev G.G., Savostyanov A.N., Levin E.A.* Alpha synchronization and anxiety: implications for inhibition vs. alertness hypotheses. Int J Psychophysiol. 2006. 59 (2): 151–158.
- Knyazev G., Merkulova E., Savostyanov A., Bocharov A., Saprigyn A.* Personality and EEG correlates of reactive social behavior. Neuropsychologia. 2019. 124: 98–107.
- Konvalinka I., Bauer M., Stahlhut C., Hansen L.K., Roepstorff A., Frith C.D.* Frontal alpha oscillations distinguish leaders from followers: multivariate decoding of mutually interacting brains. Neuroimage. 2014. 1. 94: 79–88.
- Li L., Bachevalier J., Hu X., Klin A., Preuss T.M., Shultz S., Jones W.* Topology of the Structural Social Brain Network in Typical Adults. Brain Connect. 2018. 8 (9): 537–548.
- Lockley S.W., Evans E.E., Scheer F.A., Brainard G.C., Czeisler C.A., Aeschbach D.* Short-wavelength sen-

- sitivity for the direct effects of light on alertness, vigilance, and the waking electroencephalogram in humans. *Sleep*. 2006. 29 (2): 161–168.
- Mahjoory K., Cesnaite E., Hohlefeld F.U., Villringer A., Nikulin V.V.* Power and temporal dynamics of alpha oscillations at rest differentiate cognitive performance involving sustained and phasic cognitive control. *NeuroImage*. 2019. 188: 135–144.
- Miskovic V., Ashbaugh A.R., Santesso D.L., McCabe R.E., Antony M.M., Schmidt L.A.* Frontal brain oscillations and social anxiety: a cross-frequency spectral analysis during baseline and speech anticipation. *Biol. Psychol.* 2010. 83: 125–132.
- Mu Y., Fan Y., Mao L., Han S.* Event-related theta and alpha oscillations mediate empathy for pain. *Brain Res.* 2008. 1234: 128–136.
- Palacios-García I., Silva J., Villena-González M., Campos-Arteaga G., Artigas-Vergara C., Luarte N., Rodríguez E., Bosman C.A.* Increase in Beta Power Reflects Attentional Top-Down Modulation After Psychosocial Stress Induction. *Front Hum Neurosci.* 2021. 15: 630813.
- Papo D.* Why should cognitive neuroscientists study the brain's resting state? *Front. Hum. Neurosci.* 2013. 7 (45): 1.
- Perry A., Stein L., Bentin S.* Motor and attentional mechanisms involved in social interaction—Evidence from mu and alpha EEG suppression. *Neuroimage*. 2011. 58: 895–904.
- Petit S., Badcock N.A., Grootswagers T., Woolgar A.* Unconstrained multivariate EEG decoding can help detect lexical-semantic processing in individual children. *Sci Rep.* 2020. 10 (1): 10849.
- Prat C.S., Yamasaki B.L., Kluender R.A., Stocco A.* Resting-state qEEG predicts rate of second language learning in adults. *Brain and Language*. 2016. 157–158: 44–50.
- Rizzolatti G., Sinigaglia C.* *Mirrors in the brain: how our minds share actions and emotions* — Oxford University Press, 2008. 242 p.
- Sadaghiani S., Hesselmann G., Kleinschmidt A.* Distributed and antagonistic contributions of ongoing activity fluctuations to auditory stimulus detection. *J Neurosci.* 2009. 29 (42): 13410–13417.
- Sadaghiani S., Scheeringa R., Lehongre K., Morillon B., Giraud A.L., Kleinschmidt A.* Intrinsic connectivity networks.  $\alpha$  oscillations. and tonic alertness: A simultaneous electroencephalography/functional magnetic resonance imaging study. *J. Neurosci.* 2010. 30 (30): 10243–10250.
- Sargent K., Chavez-Baldini U., Master S.L., Verweij K.J.H., Lok A., Sutterland A.L., Vulink N.C., Denys D., Smit D.J.A., Nieman D.H.* Resting-state brain oscillations predict cognitive function in psychiatric disorders: A transdiagnostic machine learning approach. *Neuroimage Clin.* 2021. 30: 102617.
- Zhao G., Zhang Y., Ge Y.* Frontal EEG Asymmetry and Middle Line Power Difference in Discrete Emotions. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*. 2018. 12.
- Zinchenko O., Savelo O., Klucharev V.* Role of the prefrontal cortex in prosocial and self-maximization motivations: An rTMS study. *Scientific Reports*, 2021. 11 (1): 22334.

## THETA AND ALPHA BANDS SPECTRAL POWER OF RESTING-STATE EEG IN GROUPS WITH DIFFERENT EFFICIENCY OF JOINT ACTIVITY IN DIADS

E. P. Murtazina<sup>a, #</sup> and Yu. A. Ginzburg-Shic<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Anokhin Institute of Normal Physiology, Moscow, Russia

<sup>#</sup>e-mail: e.murtazina@nphys.ru

The aim of the study was to compare the spectral characteristics of theta and alpha frequency bands of the resting-state EEG between groups of subjects with different performance of subsequent joint sensorimotor activity in dyads. The study involved 26 men who, in 13 pairs, performed “Columns” trainings with biofeedback from EMG signals from the flexor muscles of the leading hand. According to their performance, the subjects of each pair were assigned to one of 2 groups: “winners” or “losers”. A higher spectral power of the theta rhythm of the EEG with closed eyes was found in the group of “losers” in comparison with the group of “winners” in the frontal, central and temporal zones of the cortex. The “winners” showed a higher level of spectral power of the EEG alpha rhythm with the eyes closed, especially in the alpha-2 frequency range in all 8 zones. The effectiveness of individual and joint training correlated negatively with the theta power and positively with the power of the EEG alpha rhythms in the closed-eyed state.

**Keywords:** resting-state EEG, theta rhythm, alpha rhythm, sensorimotor test, joint activity, competition, cooperation