

УДК 612.822.3

ЭЭГ-КОРРЕЛЯТЫ ПОДГОТОВИТЕЛЬНОГО И ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ВНИМАНИЯ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЗАДАНИЙ С РАЗЛИЧНОЙ НАПРАВЛЕННОСТЬЮ ВНИМАНИЯ

© 2020 г. Ю. А. Бойцова^{1,*}, С. Г. Данько¹, М. Л. Соловьева¹,
Л. М. Качалова², И. А. Куперман²

¹ФГБУН Институт мозга человека имени Н.П. Бехтеревой РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Международная группа компаний “Электронное образование”, Москва, Россия

*E-mail: Boytsova.ihb@gmail.com

Поступила в редакцию 19.11.2019 г.

После доработки 03.02.2020 г.

Принята к публикации 19.04.2020 г.

В данной статье исследуется режим выполнения когнитивных заданий, при котором время их выполнения сокращается до секунд, когнитивная деятельность повторяется многократно, при этом этапы кратковременного доминирования внешне-ориентированного (сенсорного) внимания сменяются этапами более длительного доминирования либо сенсорного, либо внутренне-ориентированного (ментального) внимания, — нестационарный режим выполнения заданий. Такой режим, по сравнению с ранее использовавшимся стационарным режимом, при котором испытуемые длительное время находились либо в состоянии доминирования сенсорного внимания, либо в состоянии ментального внимания, приближен к реальным режимам научения, в том числе при использовании методик электронного образования. Такой режим также позволяет сопоставить корреляты ментального и сенсорного внимания на разных этапах реализации процессов внимания во времени. Анализ предварительных данных показывает, что на этапе подготовительного внимания ЭЭГ-различия между заданиями с доминированием ментального и сенсорного внимания намного меньше, чем различия на этапе исполнительного внимания, что предполагает неспецифичный характер подготовительного внимания.

Ключевые слова: ЭЭГ, ментальное внимание, сенсорное внимание, исполнительное внимание, подготовительное внимание.

DOI: 10.31857/S0131164620050033

Мозговые механизмы основных видов или классов внимания, а именно сенсорного внимания, моторного и ментального [1] исследованы далеко не в равной степени. Так, поиск по ключу “*attention AND brain AND human*” в поисковой системе *PubMed Central* дал 190937 научных публикаций. Однако замены в ключе поиска “*attention*” на любой из терминов “*mental attention*”, “*intellectual attention*”, “*internal attention*”, “*attention to internal information*”, “*attention to internal processing*”, “*internally directed attention*”, “*internal attentional state*”, “*internalized attention*”, в той или иной мере синонимичных для ментального внимания, в сумме дали только 550 публикаций.

Причина такого неравенства, в первую очередь, в возможности экспериментального контроля внешних входов в ситуациях исследования внимания сенсорного (перцептивного) и отсутствия такой возможности для внутренних входов (мыслей, знаний и воспоминаний) при исследо-

ваниях ментального (интеллектуального) внимания [2]. Поиск методических подходов, которые позволили бы объективно исследовать деятельность мозга в таких трудных условиях, продолжается, в частности, с применением электроэнцефалографических (ЭЭГ) средств. Ранее указанная трудность преодолевалась стационарным режимом выполнения заданий, т.е. при длительном (до нескольких минут) пребывании в состоянии ментального внимания [3–12]. Для изучения же мозговых коррелят сенсорного внимания использовались, и используются, схемы исследования, направленные на анализ связанных с событиями потенциалов или связанных с событиями измененной спектральной мощности ЭЭГ (вызванной синхронизации/десинхронизации ЭЭГ) [13], при которых время выполнения того или иного задания существенно меньше (до нескольких секунд), но однородная деятельность повторяется многократно с соответствующим контролем внешних

входов. Можно указать на современные работы, где такая схема исследования была применена и для изучения процессов, в которых определяющую роль должны играть механизмы ментального внимания [14, 15]. Привлекательность применения такой схемы, прежде всего, в том, что она не только позволяет сопоставить корреляты ментального и сенсорного внимания, но также создает возможности для рассмотрения коррелят ментального внимания на разных этапах его реализации во времени.

Нами были проведены предварительные исследования мощности ЭЭГ в нескольких частотных диапазонах в парадигме вызванной активности, т.е. при смене кратких по времени выполнения заданий на продуктивное и репродуктивное воображение (нестационарный режим выполнения ментальных заданий). Полученные результаты [16] указывали на то, что ЭЭГ-корреляты выполнения заданий в нестационарном режиме отличаются от полученных нами ранее в режиме стационарном [12]. В настоящей работе исследования в нестационарном режиме были продолжены с новой группой испытуемых и с несколько отличным вариантом тестовых заданий.

В настоящее время развитие психофизиологических исследований вывело на первый план проблемы повышения надежности и воспроизводимости получаемых результатов. Это отражено, в частности, в специальных тематических выпусках ведущих международных журналов *Psychophysiology* [17] и *International Journal of Psychophysiology* [18]. В соответствии со сделанными рекомендациями специальное внимание при продолжении исследования нами было уделено увеличению числа испытуемых и контролю воспроизводимости результатов, а применяемые оценки статистической достоверности наблюдаемых различий были дополнены показателем мощности эффекта (“*effect size*”).

МЕТОДИКА

В данном исследовании принимали участие две группы испытуемых: в первую группу вошли 23 добровольца (из них 16 женщин, средний возраст 29 лет), во вторую группу вошли 22 добровольца (из них 15 женщин, средний возраст 28 лет). С обеими группами применяли схему проведения эксперимента, как при исследовании вызванной синхронизации/десинхронизации ЭЭГ (нестационарный режим выполнения заданий), но при этом анализировали параметры спектральной мощности ЭЭГ, аналогично тому, как это делалось при анализе квазистационарных параметров ЭЭГ в случае стационарного режима выполнения заданий [12].

Тестовые задания на сенсорное и ментальное внимание в первой группе испытуемых и основные полученные результаты описывали ранее [16]. Следует обратить внимание на основные детали. Задания предъявляли однородными блоками, в каждом блоке по 80 проб (“*stay trials*”). В качестве стимулов использовали слова-существительные и простые цветные изображения, предъявляемые на белом фоне. В блоке заданий с доминированием сенсорного внимания (ДСВ) пробами являлись пары стимулов: слово и соответствующее цветное изображение. Испытуемых просили запомнить изображение. Для исследования состояний с доминированием ментального внимания (ДМВ) использовали задания на продуктивное (ДМВп) и репродуктивное воображение (ДМВр). В блоке заданий ДМВр (доминирование памяти) использовали стимулы: слово и белый экран. Предъявляли слова, использованные в предыдущем задании на сенсорное внимание. После предъявления слова испытуемых просили вспомнить и мысленно представить себе зрительный образ, соответствующий слову, на фоне белого экрана компьютера. В блоке заданий ДМВп (доминирование творческого, продуктивного воображения) стимулами являлись два слова и белый экран. Два слова предъявляли одновременно, после этого испытуемых просили придумать и мысленно представить себе зрительный образ изображения-химеры, состоящий из деталей изображений, которые соответствуют предъявленным словам.

Тестовые задания на сенсорное и ментальное внимание во второй группе испытуемых были несколько модифицированы. Здесь задания также предъявляли однородными блоками, каждый блок содержал 40 проб. В качестве стимулов использовали словосочетания из 2-х слов (назывные предложения, например, “вечерний пляж”) и соответствующие им развернутые цветные эмоционально-положительные изображения из международной системы изображений – *International Affective Picture System* [19]. В блоке заданий с ДСВ испытуемых просили запомнить фразу и соответствующее ей изображение. В блоке заданий ДМВр испытуемые должны были, возможно, более детально вспомнить изображение, сопровождавшее предъявленную фразу, и мысленно визуализировать его на белом экране компьютера. В блоке заданий ДМВп испытуемые должны были вообразить и мысленно визуализировать развернутую картину, соответствующую новой для них фразе, предъявленной в этой пробе.

Для всех испытуемых длительность предъявления вербальных стимулов составила – 500 мс, длительность предъявления второго стимула (изображение или белый экран) – 5000 мс, интервал между стимулами в паре – 800 мс. Интервал между пробами варьировал от 700 до 1000 мс.

Блоки тестовых заданий ДМВп и ДМВр чередовали по порядку следования для каждого испытуемого. В сериях этих заданий в конце каждой пробы испытуемые нажимали на кнопку, если им удалось вспомнить или придумать изображение. Анализ подвергали те пробы, в которых были нажатия. В блоке заданий с ДСВ испытуемые также нажимали на кнопку, но здесь нажатие использовали только для придания моторного единообразия выполнению всех видов заданий. Все задания выполняли с открытыми глазами. Состояние покоя с открытыми глазами (ПГО), с фиксацией взора на точке, использовали в качестве референтного.

Запись ЭЭГ выполняли в полосе пропускания 0–70 Гц с частотой дискретизации 500 Гц. Использовали электроэнцефалограф “*Mitzar EEG202*” с программным пакетом *WinEEG* (авторские права В.А. Пономарев, Ю.Д. Кропотов, № гос регистрации 2001610516, 08.05.2001). Регистрацию ЭЭГ проводили от 19 зон поверхности головы (система 10–20), монополярно с объединенными референтными электродами на мочках ушей. Метод независимых компонент (*ICA*) применяли для коррекции артефактов кардиограммы, моргания и движения глаз. Анализ спектральной мощности для состояния ПГО проводили на участке записи длительностью 3 мин. Для тестовых заданий анализ мощности ЭЭГ проводили на участках длительностью 5 с в каждой пробе во время предъявления слайдов или белого экрана, инициирующего либо сенсорные процессы, либо процессы вспоминания или воображения. Также анализ мощности проводили на интервалах длительностью 300 мс перед первым стимулом в каждой пробе. Для этого участки ЭЭГ определенной длины выделяли на соответствующих этапах записи, с последующим объединением их в последовательную запись ЭЭГ. Далее, при визуальном просмотре записей ЭЭГ, полученных в результате объединения, из последующего анализа удаляли участки, на которых просматривали возможные разрывы на границах объединенных участков. Для подсчета спектральной мощности ЭЭГ использовали эпоху анализа секунда с перекрытием эпох 50%. Каждый отрезок ЭЭГ сглаживался временным окном Ханна. Средние оценки абсолютной мощности рассчитывали для каждого испытуемого в каждом состоянии, в каждом из отведений. Нормализацию полученных данных проводили путем логарифмирования ($Y = \lg X$). Статистическую обработку ЭЭГ-данных (*STATISTICA* 11.0, № АХА207F396330FA-5) проводили с использованием дисперсионного анализа *ANOVA*. В анализе использовали подсубъектные факторы D – 3 частотных диапазона ЭЭГ, S – два сравниваемых задания, Z – 19 ЭЭГ-отведений. Оценку достоверности влияния основных факторов и их взаимодействий проводили с учетом поправки

Гринхауза-Гайзера. Оценивали также статистическую мощность эффекта по критерию этаквадрат (η^2). Значимые различия средних величин в конкретных зонах выявляли посредством множественных сравнений с использованием критериев *Fisher LSD* (более чувствительного) и *Tukey HSD* (более строгого).

Поскольку предварительное сравнение результатов в каждой из групп испытуемых показало сходство статистически достоверных различий мощности ЭЭГ в рассматриваемых контрастах, в настоящей публикации представлены результаты статистических оценок по объединенной группе испытуемых в трех частотных диапазонах: θ (4–7 Гц), α_1 (7–10 Гц) и α_2 (10–13 Гц).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 1 представлены сравнения мощности ЭЭГ при выполнении заданий с доминированием ментального внимания относительно задания с доминированием сенсорного внимания. Статистический анализ показал, что мощность в попарно сравниваемых заданиях достоверно различается, статистическая значимость факторов D , S и их взаимодействия приведены в табл. 1. Задание ДМВп при этом характеризуется меньшими значениями мощности в θ - и α_1 -диапазонах ЭЭГ почти во всех зонах, но большими значениями α_2 -мощности в затылочно-париетальных отделах. Задание ДМВр (относительно задания ДСВ) характеризуется примерно теми же соотношениями мощности ЭЭГ и уровнями статистической значимости как и задание ДМВп.

На рис. 2 представлены сравнения мощности ЭЭГ при выполнении тестовых заданий относительно мощности в состоянии ПГО. Статистический анализ показал, что мощность в попарно сравниваемых заданиях здесь также достоверно различается, статистическая значимость факторов D , S и их взаимодействия приведены в табл. 1. Задание ДМВр (относительно ПГО) характеризуется меньшими значениями мощности в θ - и α_1 -диапазонах ЭЭГ в передне-височных и теменных отделах, но большими значениями α_2 -мощности в затылочно-париетальных отделах. Задание ДМВп отличается от состояния ПГО генерализованно выраженными уменьшениями мощности в θ - и α_1 -диапазонах, преимущественно в передних отделах, большими значениями α_2 -мощности в затылочных отделах и локальным уменьшением α_2 -мощности в правом теменном отведении. Задание ДСВ отличается от состояния ПГО большими значениями мощности в θ -диапазоне в лобных и в правом затылочном отведениях, большими значениями мощности в α_1 -диапазоне в правом затылочном отведении, но меньшими значениями α_2 -мощности в задних отделах коры.

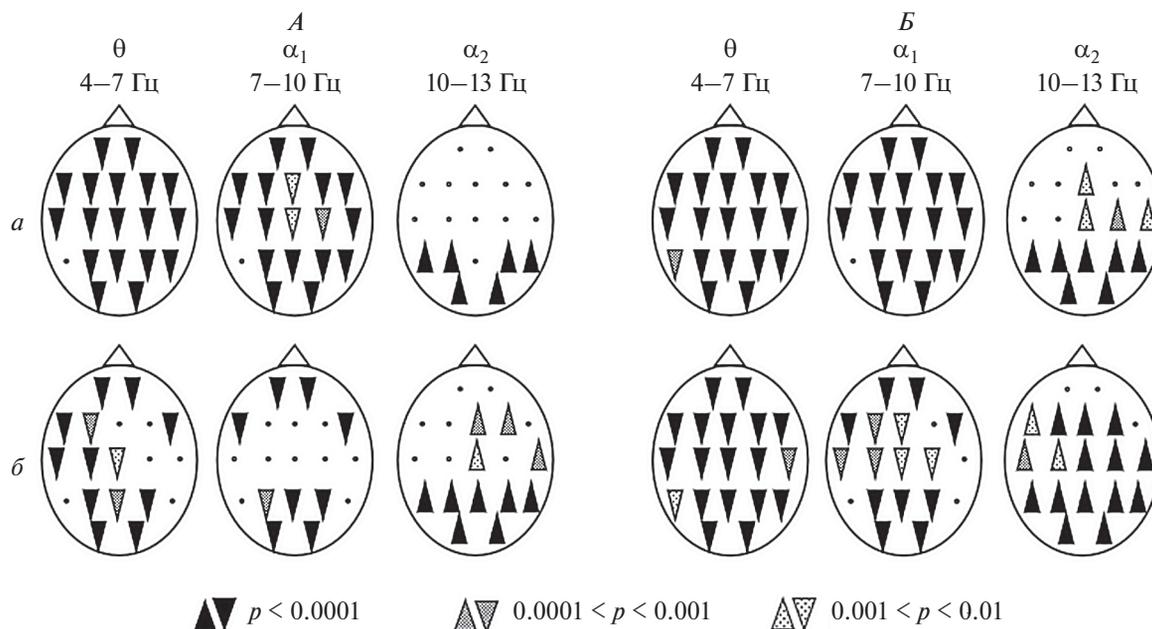


Рис. 1. Сравнения мощности ЭЭГ в трех частотных диапазонах при выполнении заданий с доминированием ментального и сенсорного внимания.
a – Сравнение ЭЭГ при выполнении задания ДМВп относительно ЭЭГ при выполнении задания ДСВ; *б* – сравнение ЭЭГ при выполнении задания ДМВр относительно ЭЭГ при выполнении задания ДСВ. Треугольник, направленный вверх – большие значения мощности, треугольник, направленный вниз – меньшие значения мощности, заливка треугольника отражает степень статистической достоверности зональных различий. *A* – представлены зональные различия (*post-hoc comparisons*) с использованием более строгого критерия *Tukey HSD*; *B* – представлены зональные различия (*post-hoc comparisons*) с использованием критерия *Fisher LSD*.

Использование критерия *Tukey HSD* для выявления зонального распределения ЭЭГ-различий приводит к тому, что в сравнениях на рис. 2, в некоторых диапазонах ЭЭГ различия выявляются только в отдельных зонах коры (при использовании менее жесткого критерия Фишера значимость проявляется в заметно большем числе зон).

При сравнении ЭЭГ на интервалах перед первым стимулом в пробе с ЭЭГ в состоянии покоя (рис. 3) также имеет место достоверные эффекты для факторов *D* и *S* и достоверные эффекты взаимодействия рассматриваемых факторов (табл. 1). Так, ЭЭГ на предстимульных интервалах в блоке заданий ДМВр отличается от ЭЭГ в состоянии ПГО большими значениями мощности в θ -диапазоне ЭЭГ в затылочно-париетальных отделах и меньшими значениями α_2 -мощности в задних отделах коры. ЭЭГ на предстимульных интервалах в блоке заданий ДМВп относительно ЭЭГ в состоянии ПГО характеризуется большими значениями мощности в θ -диапазоне в правом затылочном отведении, но меньшими значениями мощности в α_1 -диапазоне в левом передне-височном отведении и меньшими значениями в 15 отведениях центральной и теменно-затылочной областей в α_2 -диапазоне. В блоке заданий ДСВ ЭЭГ на предстимульных интервалах относительно ЭЭГ в состоянии покоя отличается большими значениями

мощности в θ -диапазоне практически во всех зонах коры, большими значениями мощности в α_1 -диапазоне в лобных и левом затылочном отведении и уменьшениями α_2 -мощности в центральных и теменных зонах. Здесь использование критерия *Tukey HSD* также приводит к тому, что ЭЭГ-различия выявляются в единичных отведениях.

Прямые сравнения ЭЭГ на предстимульных интервалах в блоках заданий на ментальное внимание с ЭЭГ на предстимульных интервалах в блоке заданий на сенсорное внимание не выявили статистической значимости взаимодействия факторов диапазонов, состояний и зон.

Сравнение ЭЭГ в состояниях выполнения заданий относительно ЭЭГ на соответствующих предстимульных интервалах (рис. 4) также обнаруживает достоверное влияние рассматриваемых факторов и их взаимодействия (табл. 1). ЭЭГ при выполнении заданий ДМВр относительно соответствующих предстимульных участков характеризуется генерализованными уменьшениями мощности в θ -диапазоне, меньшими значениями α_1 -мощности в средне-височных отделах и увеличенными значениями α_2 -мощности на всей поверхности коры. Выполнение заданий ДМВп относительно предстимульных участков также ха-

Таблица 1. Статистическая значимость факторов D , S и значимость их взаимодействия ($3 \times 2 \times 19 ANOVA$) для сравнения каждой пары состояний

	Статистическая значимость факторов D , S и значимость их взаимодействия ($3 \times 2 \times 19 ANOVA$)			
	$D \times S \times Z$	$D \times S$	D	S
Два сравниваемых состояния				
ДМВр/ДСВ	$F(36,1584) = 11.88$, $p = 0.0000$, $\eta^2 = 0.21$	$F(2,88) = 37.51$, $p = 0.0000$, $\eta^2 = 0.46$	$F(2,88) = 55.73$, $p = 0.0000$, $\eta^2 = 0.55$	$F(1,44) = 4.81$, $p = 0.033$, $\eta^2 = 0.09$
ДМВр/ДСВ	$F(36,1584) = 13.81$, $p < 0.0000$, $\eta^2 = 0.23$	$F(2,88) = 36.13$, $p = 0.0000$, $\eta^2 = 0.45$	$F(2,88) = 50.68$, $p = 0.0000$, $\eta^2 = 0.53$	
ДМВр/ПГО	$F(36,1584) = 4.59$, $p = 0.00005$, $\eta^2 = 0.09$	$F(2,88) = 15.92$, $p = 0.00002$, $\eta^2 = 0.26$	$F(2,88) = 30.90$, $p = 0.00000$, $\eta^2 = 0.41$	
ДМВр/ПГО	$F(36,1584) = 4.76$, $p = 0.00002$, $\eta^2 = 0.09$	$F(2,88) = 15.63$, $p = 0.00005$, $\eta^2 = 0.26$	$F(2,88) = 33.83$, $p = 0.00000$, $\eta^2 = 0.43$	$F(1,44) = 7.43$, $p = 0.009$, $\eta^2 = 0.14$
ДСВ/ПГО	$F(36,1584) = 14.26$, $p = 0.00000$, $\eta^2 = 0.24$	$F(2,88) = 17.59$, $p = 0.00005$, $\eta^2 = 0.28$	$F(2,88) = 71.92$, $p = 0.00000$, $\eta^2 = 0.62$	
ДМВр/предстимул/ПГО	$F(36,1584) = 8.44$, $p = 0.00000$, $\eta^2 = 0.16$	$F(2,88) = 25.44$, $p = 0.00000$, $\eta^2 = 0.36$	$F(2,88) = 110.80$, $p = 0.00000$, $\eta^2 = 0.71$	$F(1,44) = 25.44$, $p = 0.00000$, $\eta^2 = 0.36$
ДМВр/предстимул/ПГО	$F(36,1584) = 8.72$, $p = 0.00001$, $\eta^2 = 0.16$	$F(2,88) = 22.31$, $p = 0.00000$, $\eta^2 = 0.37$	$F(2,88) = 90.43$, $p = 0.00000$, $\eta^2 = 0.67$	
ДСВ/предстимул/ПГО	$F(36,1584) = 7.56$, $p = 0.00001$, $\eta^2 = 0.14$	$F(2,88) = 18.67$, $p = 0.00006$, $\eta^2 = 0.29$	$F(2,88) = 120.54$, $p = 0.00000$, $\eta^2 = 0.73$	$F(1,44) = 3.94$, $p = 0.05$, $\eta^2 = 0.08$
ДМВр/предстимул/ДМВр	$F(36,1584) = 5.25$, $p = 0.00002$, $\eta^2 = 0.10$	$F(2,88) = 37.00$, $p = 0.00006$, $\eta^2 = 0.45$	$F(2,88) = 76.81$, $p = 0.00000$, $\eta^2 = 0.63$	
ДМВр/предстимул/ДМВр	$F(36,1584) = 5.35$, $p = 0.00000$, $\eta^2 = 0.10$	$F(2,88) = 37.61$, $p = 0.00000$, $\eta^2 = 0.46$	$F(2,88) = 70.29$, $p = 0.00000$, $\eta^2 = 0.61$	
ДСВ/предстимул/ДСВ	$F(36,1584) = 5.83$, $p < 0.00001$, $\eta^2 = 0.11$	$F(2,88) = 7.34$, $p = 0.0033$, $\eta^2 = 0.14$	$F(2,88) = 210.18$, $p = 0.00000$, $\eta^2 = 0.82$	$F(1,44) = 20.18$, $p = 0.00005$, $\eta^2 = 0.31$

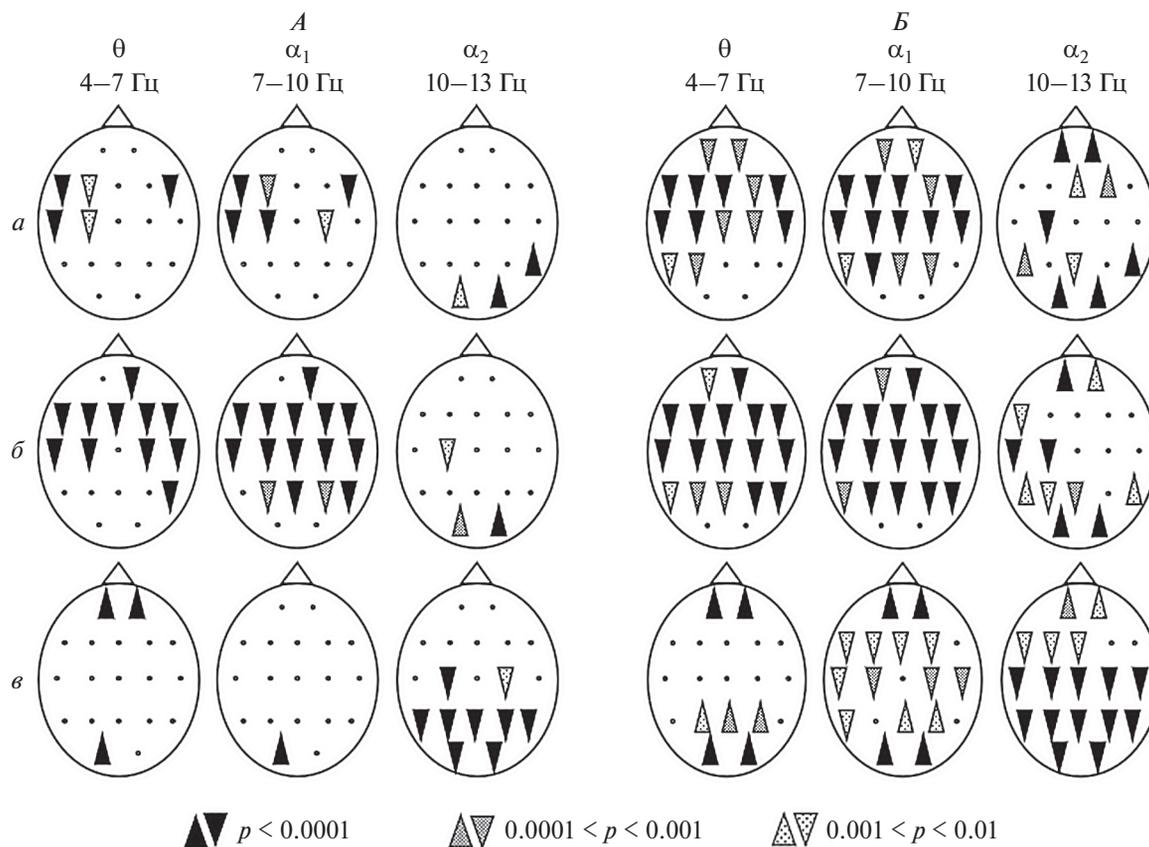


Рис. 2. Сравнения мощностей ЭЭГ в трех частотных диапазонах при выполнении тестовых заданий относительно состояния покоя. *a* – Сравнение ЭЭГ при выполнении задания ДМВр с ЭЭГ в состоянии покоя (ПГО); *б* – сравнение ЭЭГ при выполнении задания ДМВп с ЭЭГ в состоянии покоя (ПГО); *в* – сравнение ЭЭГ при выполнении задания ДСВ с ЭЭГ в состоянии покоя (ПГО). Остальные обозначения см. рис. 1.

рактируется уменьшениями θ - и α_1 -мощности на большей части коры и генерализованными увеличениями α_2 -мощности. Выполнение заданий с ДСВ относительно предстимульных участков отличается меньшими значениями мощности во всех рассматриваемых диапазонах, в θ -диапазоне эти уменьшения выражены по всей поверхности коры, в α_1 - и α_2 -диапазонах они отмечаются преимущественно в височных отведениях. Применение менее жесткого критерия Фишера к этим сравнениям приводит к тому, что различия указанных знаков достигают значимости повсеместно.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Пока нельзя однозначно разделить эффекты ментального внимания и сенсорного внимания по объективным признакам, поскольку в реальных поведенческих актах должны присутствовать и те, и другие эффекты. Можно их разделить условно по характеру задания, понимая при этом, что при их выполнении оба вида внимания взаи-

модействуют (наиболее очевидно это проявляется в задании на запоминание образов). Поэтому, упоминая об ЭЭГ-коррелятах заданий на ментальное внимание или на сенсорное внимание (то же относится к коррелятам готовности к выполнению таких заданий), предпочтительно говорить о коррелятах доминирования ментального или сенсорного внимания.

ЭЭГ-корреляты исполнительного внимания при выполнении заданий. Анализ объединенных данных, полученных при применении сходных по дизайну методик исследования у двух групп испытуемых, позволил подтвердить на более высоком уровне статистической достоверности соотношения локальной синхронизации ЭЭГ в состояниях выполнения заданий ДМВ и состояния покоя, выявленные ранее с применением нестационарного режима выполнения заданий [16]. Это, например, уменьшение θ - и α_1 -мощности при выполнении заданий на оба вида воображения при относительно слабых изменениях α_2 -мощности (рис. 2). Это позволяет считать, что основные результаты, полученные с двумя группами испы-

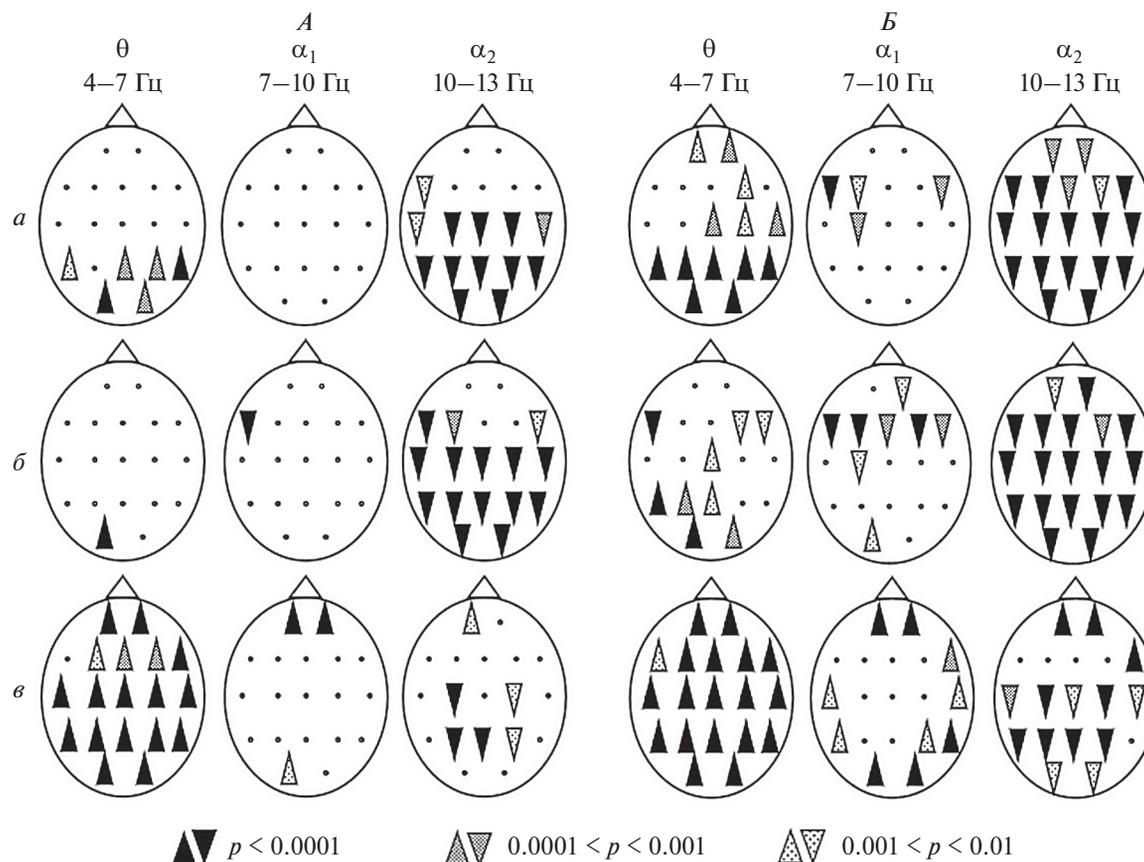


Рис. 3. Сравнения мощности ЭЭГ в трех частотных диапазонах на временном интервале перед первым стимулом в пробе с состоянием покоя.

a – Сравнение ЭЭГ на предстимульном участке в задании ДМВр с ЭЭГ в состоянии покоя (ПГО); *б* – сравнение ЭЭГ на предстимульном участке в задании ДМВп с ЭЭГ в состоянии покоя (ПГО); *в* – сравнение ЭЭГ на предстимульном участке в задании ДСВ с ЭЭГ в состоянии покоя (ПГО). Остальные обозначения см. рис. 1.

туемых и при несколько различном характере заданий в этих группах, статистически достоверны и воспроизводимы.

Вместе с тем, полученные в данной работе результаты при нестационарном режиме выполнения заданий отличаются от результатов, полученных ранее при стационарном режиме [12]. Эти данные подкрепляются, например, результатами прямого сравнения ЭЭГ при выполнении заданий на оба вида воображения с ЭЭГ при выполнении задания ДСВ (рис. 1). Ранее было показано, что задание ДМВп отличается от ДМВр большими значениями мощности в θ - и α_1 -диапазонах ЭЭГ [12]. В настоящей работе показано, что относительно задания ДСВ оба задания ДМВ отличаются сходным образом (рис. 1). ЭЭГ-корреляты выполнения заданий ДМВ характеризуются более низким уровнем мощности ЭЭГ в θ - и α_1 -диапазонах и более высоким уровнем мощности в диапазоне α_2 , главным образом в задних отделах коры. Эти данные указывают на достовер-

ную специфичность ЭЭГ-коррелят исполнительного внимания в заданиях ДМВ и ДСВ.

Этим соотношениям можно найти определенные соответствия в литературе. Так при исследовании визуально-пространственной рабочей памяти показано, что при увеличении когнитивной нагрузки происходит увеличение выраженности высокочастотной α -активности в задних отделах коры [20]. С использованием модифицированного *Sternberg* теста показано, что высокочастотная α -активность положительно коррелирует с нагрузкой на рабочую память [21]. При исследовании ЭЭГ-коррелят, так называемых *ganzfeld* иллюзий, возникающих в следствие зрительной сенсорной депривации, также показано увеличение мощности быстрого α -ритма [22], тогда как мощность в α_1 -диапазоне во время иллюзий уменьшается. Авторы рассматривают последнее как отражение процесса сосредоточения, концентрации внешнего внимания на задаче нажать на кнопку в момент возникновения иллюзий. При исследовании коррелят зрительной памяти

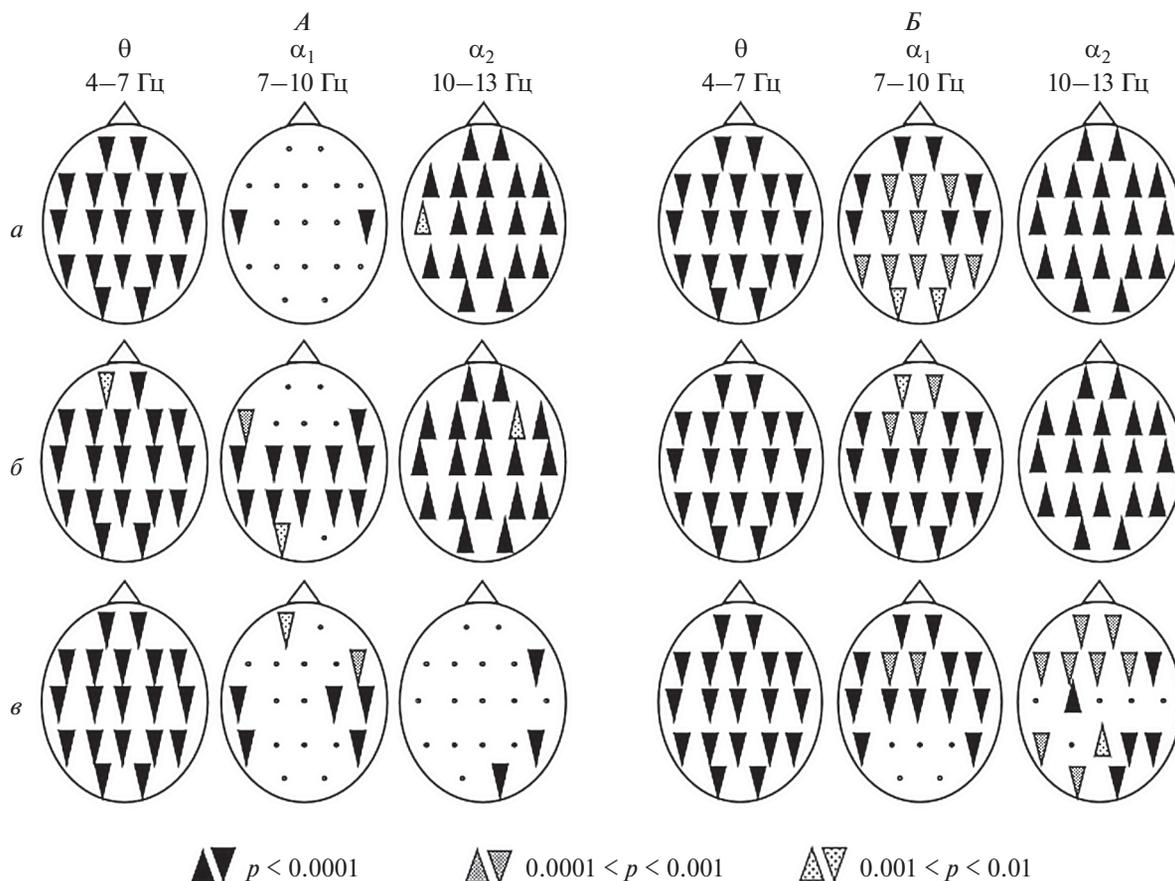


Рис. 4. Сравнения мощности ЭЭГ в трех частотных диапазонах при выполнении тестовых заданий относительно интервала перед первым стимулом в пробе.

a – Сравнение ЭЭГ при выполнении задания ДМВр относительно ЭЭГ на предстимульном участке; *б* – сравнение ЭЭГ при выполнении задания ДМВп относительно ЭЭГ на предстимульном участке; *в* – сравнение ЭЭГ при выполнении задания ДСВ относительно ЭЭГ на предстимульном участке. Остальные обозначения см. рис. 1.

(сравнение предъявленного и предыдущего зрительного стимула) показано, что низкочастотная α -активность в париетально-центральных отделах уменьшается с увеличением нагрузки на рабочую память [23].

Ситуация с соотношением в диапазоне θ не так однозначна. Литературные источники указывают на возрастание θ -мощности в ситуациях обращения к памяти, т.е. в процессе усиления ментальной нагрузки [24–28]. В нашем случае мощность ЭЭГ в этом диапазоне при выполнении заданий на ментальное внимание уменьшается относительно мощности в состоянии ПГО, а при выполнении задания на сенсорное внимание, напротив, увеличивается (рис. 2). Можно полагать, что в последней ситуации наши данные согласуются с литературными, которые также собраны в тестах с использованием зрительных стимулов и на фоне зрительной стимуляции. Но результаты, приведенные на рис. 3 и 4, заставляют добавить к этому некоторые серьезные оговорки.

ЭЭГ-корреляты подготовительного внимания. Следует напомнить, что изменения мощности ЭЭГ на интервалах времени перед предъявлением первого стимула в пробе рассматриваются как корреляты подготовительного внимания, направленного на оптимальную подготовку к выполнению предстоящего задания-пробы.

ЭЭГ-корреляты подготовительного внимания относительно состояния покоя характеризуются преимущественно однонаправленными изменениями мощности ЭЭГ для рассматриваемых заданий (рис. 3), хотя эти изменения проявляются в разной степени в разных сравнениях. Если обратиться к прямым сравнениям ЭЭГ на предстимульных интервалах для разных заданий между собой, то здесь различия не достигают уровня статистической значимости. Это подтверждает то, что различия между ЭЭГ-коррелятами заданий ДМВ и ДСВ на этапе подготовительного внимания много меньше, чем различия между таковыми на этапе исполнительного внимания.

В наблюдаемых на рис. 3 различиях по своей выраженности выделяются увеличения мощности в θ -диапазоне в блоке заданий с ДСВ и уменьшения α_2 -мощности в блоках заданий ДМВ. Сравнивая рис. 2 и 3, можно видеть, что для задания ДСВ изменения ЭЭГ на предстимульном участке относительно ПГО (рис. 3) больше выражены в θ -диапазоне, чем изменения во время выполнения задания также относительно ПГО (рис. 2), и несколько меньше выражены в диапазоне α_2 . Для заданий ДМВ на предстимульном участке (рис. 3) больше выражена десинхронизация в диапазоне α_2 , которая нивелируется при непосредственном выполнении задания (рис. 2). Возможно, такую динамику ЭЭГ можно объяснить завышенной мобилизацией неких ресурсов на предстимульном участке (этап подготовительного внимания), которая сменяется редукцией используемых ресурсов при непосредственном выполнении задания. Эти ресурсы различны для заданий ДМВ и ДСВ. Используя существующие в литературе представления о связи синхронизации в θ -диапазоне с активацией рабочей памяти и о связи десинхронизации в α -диапазоне с активацией внешне-направленного внимания [3, 6, 7 и др.], можно предположить, что в предстимульный период для задания ДСВ активируется именно рабочая память, а для выполнения ментальных заданий (ДМВ) особое значение в предстимульный период играет настройка на точное восприятие вербальной информации, которая должна появиться на экране и конкретизировать задачу в следующей пробе.

Выполнение задания ДСВ относительно соответствующих предстимульных участков (подготовительное внимание) также характеризуется уменьшением мощности во всех частотных диапазонах ЭЭГ (рис. 4). Подобные изменения в картине ЭЭГ мы наблюдали ранее в условиях открывания глаз на свету [8]. Это позволяет говорить о некотором дополнительном усилении выраженности внешней направленности внимания в этом переходе.

Выполнение заданий ДМВ относительно соответствующих предстимульных участков (подготовительное внимание) характеризуется изменениями в картине ЭЭГ – уменьшение θ - и α_1 -мощности при увеличении α_2 -мощности (рис. 4), которые близки к различиям, получаемым при сравнении заданий ДМВ и задания ДСВ на этапе исполнительного внимания (рис. 1). При этом ЭЭГ-изменения при сравнении этапа выполнения задания ДМВ и подготовительного внимания (на соответствующем предстимульном интервале) выражены много сильнее. Остается до конца неясным, какие именно процессы отражаются в полученной θ - и α_1 -десинхронизации ЭЭГ при переходе от подготовительного к исполнительно-

му вниманию при ДМВ (рис. 4). В ситуации перехода к выполнению задания с ДСВ десинхронизация в θ - и α_1 -диапазонах (рис. 4) скорее является следствием синхронизации в этих диапазонах на этапе подготовительного внимания (сопоставление рис. 3 и 4). В ситуации с ДМВ десинхронизация проявляется именно на этапе исполнительного внимания, что видно из сопоставления рис. 2, 3 и 4. Ранее мы предполагали, что выполнение ментальных заданий при нестационарном режиме выполнения формирует особый режим быстрого переключения между доминантами внешнего и внутреннего внимания [16]. Данный режим способствует формированию особого функционального состояния, которое проявляет себя в разнонаправленной динамике мощности в α_2 -диапазоне с одной стороны и α_1 -, θ -диапазонах с другой (рис. 4). Выполнение заданий с ДМВ требует блокирования внешних входов, что отражается в синхронизации в α_2 -диапазоне. Но, с другой стороны, использованный режим выполнения заданий для своего обеспечения требует сохранения определенного уровня внешнего внимания для контроля окончания пробы, момента нажатия на кнопку, и перехода к следующему этапу выполнения задания. Данная дополнительная мобилизация внешне-ориентированного внимания (на фоне необходимости выполнения внутренне-ориентированного задания) обеспечивает контроль за внешними обстоятельствами эксперимента и может отражаться в десинхронизации в θ - и α_1 -диапазонах. Такое представление может базироваться на данных по отражению внешне-направленного внимания готовности (*alerting attention*) в десинхронизации ЭЭГ α - и θ -диапазонов [29].

Полученные в работе данные, в полной мере подтверждают идею функциональной гетерогенности низкочастотного и высокочастотного α -ритма, высказанную в работах *W. Klimesch* [30, 31]. Приведенные различия при сравнении ЭЭГ на участке непосредственного выполнения заданий ДМВ относительно предстимульного участка могут быть сопоставлены с результатами исследований, в которых применялась методика вызванной синхронизации-десинхронизации для изучения ментальных состояний [14, 15]. В работе [15] усиление внутренней направленности внимания сопровождалось усилением синхронизации в α_2 -диапазоне, а в работе [14] выполнение задания на воображение сопровождалось усилением синхронизации в полосе частот, охватывающей верхний и нижний α -поддиапазоны. Также наши результаты в заданиях с ДСВ на этапе исполнительного внимания (относительно предстимульного интервала) могут быть сопоставлены с исследованиями ЭЭГ-коррелят модели зрительного внимания Познера-Петерсена [29], где система внимания *executive attention* характеризуется комплексным

паттерном активности — уменьшение всех частот в период до ответа на стимул.

ВЫВОДЫ

1. ЭЭГ-корреляты состояния покоя по сравнению с коррелятами исполнительного и подготовительного внимания имеют множественные различия мощности ЭЭГ, охватывающие все пространство коры и проявляющиеся в совокупности частотных диапазонов ЭЭГ, что позволяет предположить системный характер обеспечения этих состояний.

2. Характер ЭЭГ-различий при сравнении состояний исполнительного внимания в заданиях ДМВ и задании ДСВ также указывает на системные особенности обеспечения сенсорного и ментального исполнительного внимания.

3. Различия между ЭЭГ-коррелятами выполнения заданий ДМВ и ДСВ на этапе подготовительного внимания много меньше, чем различия между таковыми на этапе исполнительного внимания, что позволяет предполагать неспецифичный характер подготовительного внимания в условиях исследования.

4. Переход к состоянию подготовительного внимания от состояния покоя для всех видов заданий характеризуется активизацией внешне-направленного внимания, что, по-видимому, является следствием нестационарного режима исследования.

5. Особенностью перехода от подготовительного внимания к исполнительному в заданиях ДМВ является увеличение синхронизации в α_2 -диапазоне, отражающая блокировку взаимодействия с внешней информацией. Переход от подготовительного внимания к исполнительному при ДСВ отражает дальнейшее усиление внешнего внимания.

Этические нормы. Все исследования проведены в соответствии с принципами биомедицинской этики, сформулированными в Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующих обновлениях, и одобрены локальной Этической комиссией Института мозга человека им. Н.П. Бехтерева РАН (Санкт-Петербург).

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

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данилова Н.Н. Психофизиология: Учебник для вузов. М.: Аспект Пресс, 2004. С. 95.
2. Дормашев Ю.Б., Романов В.Я. Психология внимания. М.: Тривола, 1995. С. 231.
3. Ray W.J., Cole H.W. EEG activity during cognitive processing: influence of attentional factors // Int. J. Psychophysiol. 1985. V. 3. № 1. P. 43.
4. Doppelmayr M.M., Klimesch W., Pachinger T., Ripper B. The Functional Significance of Absolute Power with Respect to Event-Related Desynchronization // Brain Topography. 1998. V. 11. № 2. P. 133.
5. Von Stein A., Sarnthein J. Different Frequencies for Different Scales of Cortical Integration: From Local Gamma to Long Range Alpha/Theta Synchronization // Int. J. Psychophysiol. 2000. V. 38. № 3. P. 301.
6. Cooper N.R., Croft R.J., Dominey S.J. et al. Paradox lost? Exploring the role of alpha oscillations during externally vs. internally directed attention and the implications for idling and inhibition hypotheses // Int. J. Psychophysiol. 2003. V. 47. № 1. P. 65.
7. Cooper N.R., Burgess A.P., Croft R.J., Gruzelić J.H. Investigating evoked and induced electroencephalogram activity in task-related alpha power increases during an internally directed attention task // Neuroreport. 2006. V. 17. № 2 P. 205.
8. Данько С.Г. Об отражении различных аспектов активации мозга в электроэнцефалограмме: что показывает количественная электроэнцефалография состояний покоя с открытыми и закрытыми глазами // Физиология человека. 2006. Т. 32. № 4. С. 5. Danko S.G. The Reflection of Different Aspects of Brain Activation in the Electroencephalogram: Quantitative Electroencephalography of the States of Rest with the Eyes Open and Closed // Human Physiology. 2006. V. 32. № 4. P. 377.
9. Barry R.J., Clarke A.R., Johnstone S.J., Rushby J.A. Timing of caffeine's impact on autonomic and central nervous system measures: clarification of arousal effects // Biol Psychol. 2008. V. 77. № 3. P. 304.
10. Dimitriadis S.I., Laskaris N.A., Micheloyannis S. Transition dynamics of EEG-based network microstates during mental arithmetic and resting wakefulness reflects task-related modulations and developmental changes // Cogn Neurodyn. 2015. V. 9. № 4. P. 371.
11. Бойцова Ю.А., Данько С.Г. Изменения ЭЭГ при сравнении состояний покоя с открытыми и закрытыми глазами в условиях темноты // Физиология человека. 2010. Т. 36. № 3. С. 138. Boytsova Y.A., Danko S.G. EEG differences between resting states with eyes open and closed in darkness // Human Physiology. 2010. V. 36. № 3. P. 367.
12. Бойцова Ю.А., Данько С.Г., Соловьева М.Л. Отражение состояний продуктивного и репродуктивного воображения в локальной синхронизации тета и альфа диапазонов ЭЭГ // Физиология человека. 2017. Т. 43. № 3. С. 132. Boytsova J.A., Danko S.G., Solovjeva M.L. States of productive and reproductive imagination reflected in the local synchronization of alpha and theta EEG frequencies // Human Physiology. 2017. V. 43. № 3. P. 353.
13. Pfurtscheller G. Spatiotemporal ERD/ERS patterns during voluntary movement and motor imagery // Suppl. Clin. Neurophysiol. 2000. V. 53. P. 196.
14. Bartsch F., Hamuni G., Miskovic V. et al. Oscillatory brain activity in the alpha range is modulated by the

- content of word-prompted mental imagery // *Psychophysiology*. 2015. V. 52. № 6. P. 727.
15. *Benedek M., Schickel R.J., Jauk E. et al.* Alpha power increases in right parietal cortex reflects focused internal attention // *Neuropsychologia*. 2014. V. 56. № 100. P. 393.
 16. *Бойцова Ю.А., Данько С.Г., Соловьева М.Л.* ЭЭГ-корреляты ментального внимания модифицируются режимом предъявления конкретизирующих зрительных сигналов // *Физиология человека*. 2018. Т. 44. № 3. С. 123.
Boytsova J.A., Danko S.G., Solovjeva M.L. EEG-Correlates of Mental Attention Are Modified by Presence of Specifying Visual Signals // *Human Physiology*. 2018. V. 44. № 5. P. 600.
 17. *Kappenman E.S., Keil A.* Introduction to the special issue on recentering science: Replication, robustness, and reproducibility in psychophysiology // *Psychophysiology*. 2017. V. 54. № 1. P. 3.
 18. *Larson M.J., Moser J.S.* Rigor and replication: Toward improved best practices in human electrophysiology research // *Int. J. Psychophysiol.* 2017. V. 111. P. 1.
 19. *Bradley M.M., Lang P.J.* The International Affective Picture System (IAPS) in the study of emotion and attention / *Handbook of Emotion Elicitation and Assessment* // Eds. Coan J.A., Allen J.J.B. N.Y.: Oxford University Press, 2007. P. 29.
 20. *Sauseng P., Klimesch W., Doppelmayr M. et al.* EEG alpha synchronization and functional coupling during top-down processing in a working memory task // *Hum. Brain Mapp.* 2005. V. 26. № 2. P. 148.
 21. *Jensen O., Gelfand J., Kounios J., Lisman J.E.* Oscillations in the alpha band (9–12 Hz) increase with memory load during retention in a short-term memory task // *Cereb. Cortex*. 2002. V. 12. № 8. P. 877.
 22. *Pütz P., Braeunig M., Wackermann J.* EEG correlates of multimodal ganzfeld induced hallucinatory imagery // *Int. J. Psychophysiol.* 2006. V. 61. № 2. P. 167.
 23. *Gevins A., Smith M.E., McEvoy L., Yu D.* High-resolution EEG Mapping of Cortical Activation Related to Working Memory: Effects of Task Difficulty, Type of Processing, and Practice // *Cereb. Cortex*. 1997. V. 7. № 4. P. 374.
 24. *Klimesch W., Doppelmayr M., Schwaiger J. et al.* Paradoxical alpha synchronization in a memory task // *Brain Res. Cogn. Brain Res.* 1999. V. 7. № 4. P. 493.
 25. *Klimesch W.* EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: a review and analysis // *Brain Res. Rev.* 1999. V. 29. № 2-3. P. 169.
 26. *Ishii R., Shinosaki K., Ukai S. et al.* Medial prefrontal cortex generates frontal midline theta rhythm // *Neuroreport*. 1999. V. 10. № 4. P. 675.
 27. *Klimesch W., Freundberger R., Sauseng P., Gruber W.* A short review of slow phase synchronization and memory: Evidence for control processes in different memory systems? // *Brain Res.* 2008. V. 1235. P. 31.
 28. *Данько С.Г., Бехтерева Н.П., Качалова Л.М., Соловьева М.Л.* Электроэнцефалографические характеристики когнитивно-специфического внимания готовности при вербальном обучении. Сообщение 1. Характеристики локальной синхронизации ЭЭГ // *Физиология человека*. 2008. Т. 34. № 2. С. 5.
Danko S.G., Bechtereva N.P., Kachalova L.M. et al. Electroencephalographic characteristics of cognitive-specific alerting attention in verbal learning: I. Characteristics of EEG local synchronization // *Human Physiology*. 2008. V. 34. № 2. P. 133.
 29. *Fan J., Byrne J., Worden M.S. et al.* The Relation of Brain Oscillations to Attentional Networks // *J. Neurosci.* 2007. V. 6. № 27. P. 6197.
 30. *Klimesch W., Schimke H., Ladurner G., Pfurtscheller G.* Alpha frequency and memory performance // *J. Psychophysiol.* 1990. V. 4. № 4. P. 381.
 31. *Klimesch W., Pfurtscheller G., Schimke H.* ERD – Attentional and cognitive processes in the upper and lower alpha band // *Clin. Neurophysiol.* 1993. V. 87. № 2. P. 133.

EEG-Correlates of Preparatory and Executive Attention at the Performance of Tasks with Various Directionality of Attention

J. A. Boytsova^{a, *}, S. G. Danko^a, M. L. Solovjeva^a, L. M. Kachalova^b, I. A. Kuperman^b

^a*Bechtereva Institute of the Human Brain RAS, St. Petersburg, Russia*

^b*International Group of Companies "Electronic Education", Moscow, Russia*

*E-mail: Boytsova.ihb@gmail.com

EEG is studied under non-stationary mode of cognitive tasks. In this mode, the cognitive tasks fulfillment is reduced to seconds, cognitive activity is repeated many times, the stages of short-term dominance of externally-oriented (sensory) attention are followed by stages of longer dominance of either sensory or internally-oriented (mental) attention. Previously stationary mode was used in which for a long time the subjects were either in a state of dominance of sensory attention or in a state of dominance of mental attention. The non-stationary mode is close to real learning modes, including when using electronic education techniques. The non-stationary mode also allows one to compare EEG correlates of mental and sensory attention dominance at different stages of the cognitive tasks fulfillment. An analysis of preliminary data shows that at the stage of preparatory attention, the EEG differences between tasks with a dominance of mental attention and with a dominance of sensory attention are much smaller than the differences at the stage of executive attention. This observation suggests that the preparatory attention is mostly non-specific to the attention directionality unlike the executive one.

Keywords: EEG, mental attention, sensory attention, executive attention, preparatory attention.