

УДК 612.821.2

СПЕКТРАЛЬНАЯ МОЩНОСТЬ ЭЭГ В БЕТА-ДИАПАЗОНЕ ОТРАЖАЕТ СУБЪЕКТИВНУЮ ОЦЕНКУ ВРЕМЕНИ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАЧИ Go/NoGo

© 2020 г. М. В. Константинова¹, *, В. Н. Анисимов¹, А. В. Латанов¹

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*E-mail: konstantinova@neurobiology.ru

Поступила в редакцию 13.07.2018 г.

После доработки 22.05.2019 г.

Принята к публикации 20.08.2019 г.

Проведен анализ субъективных оценок времени выполнения различных по длительности блоков проб задачи *Go/NoGo*. При выполнении задачи регистрировали ЭЭГ. Все блоки проб были разделены на три группы, согласно квартилям распределения субъективных оценок: 1) переоценки, 2) недооценки и 3) наиболее точной оценки времени выполнения блоков. Недооценка времени сопровождалась наибольшей относительной спектральной мощностью в β -диапазоне (13–30 Гц) по сравнению с другими группами, и при этом отмечалась межполушарная асимметрия спектральной мощности β -активности в теменных отведениях. Группа наиболее точной оценки времени характеризовалась большей относительной спектральной мощностью по сравнению с группой переоценки временных интервалов, и отмечалась межполушарная асимметрия в лобных и центральных отведениях. Таким образом, субъективная оценка времени выполнения блока проб задачи *Go/NoGo* находит свое отражение в динамике относительной спектральной мощности в β -диапазоне.

Ключевые слова: ЭЭГ, оценка временных интервалов, *Go/NoGo*, относительная спектральная мощность.

DOI: 10.31857/S0131164620010099

Восприятие времени – важная составляющая нормальной жизнедеятельности человека. Так как мы не обладаем отдельной сенсорной системой для оценки времени, то изучение особенности психофизиологии субъективной оценки временных интервалов имеет фундаментальное значение для изучения механизмов когнитивной деятельности и интеграции информации в головном мозге человека. Одним из наиболее подходящих методов для изучения психофизиологии оценки временных интервалов является метод электроэнцефалографии (ЭЭГ), обладающий хорошим временным разрешением [1].

Среди механизмов оценки времени выделяют эксплицитный и имплицитный тайминг. Под эксплицитным таймингом понимается сознательный контроль за временем, а под имплицитным – бессознательный. Работа двух этих систем обеспечивается разными нейронными сетями: правополушарная лобно-стриарная нейронная сеть отвечает за эксплицитный тайминг, тогда как за функцию имплицитного тайминга – преимущественно нижняя теменная кора левого полушария [2]. Важно отметить, что относительно восприятия интервалов разной длительности су-

ществует мнение, что длинные и короткие временные интервалы кодируются также разными нейронными сетями [3]. Среди относительно отдельных корковых структур мозга, вовлеченных в субъективную оценку временных интервалов, *T.W. Kononowicz* и *H. van Rijn* [4], а также *H. Merchant et al.* [5] подчеркивают роль дополнительного моторного поля (*SMA*), в оценке коротких (длительностью около или менее секунды [6]) временных интервалов принимает активное участие мозжечок и кортикоцереbellлярная сеть, особенно связи *SMA* и премоторной коры с мозжечком [7].

В ряде работ субъективную оценку длительности временных интервалов связывают с мощностью ЭЭГ в β -диапазоне (13–30 Гц).

Так, *T.W. Kononowicz* и *H. van Rijn* [8] в исследовании субъективной оценки времени просили испытуемых воспроизводить временные интервалы, длительностью 2.5 с, при помощи двух нажатий на клавишу, обозначающих начало и конец воспроизводимого интервала. Была обнаружена взаимосвязь между мощностью ЭЭГ в β -диапазоне до и после нажатия на кнопку испытуемым, обозначающую начало временного интервала.

Мощность в β -диапазоне в начале производимого временного интервала является маркером длительности данного интервала: большая мощность характеризует более длинный временной интервал. Авторы объясняют полученный эффект отражением процесса моторного ингибирования и процессов аккумуляции информации при выполнении задачи на оценку временных интервалов.

Предположение о том, что именно в β -диапазоне находят отражение процессы субъективной оценки времени, нашло свое подтверждение и в исследовании с применением метода транскраниальной магнитной стимуляции (ТМС). *M. Wiener et al.* [9] показали, что только стимуляция в β -диапазоне (20 Гц) влияет на оценку временных интервалов: испытуемые после стимуляции давали более длительную оценку.

Несомненно, психофизиологическое значение изменения динамики ЭЭГ-сигнала на частоте 13–30 Гц не ограничивается субъективным восприятием времени. Активность головного мозга в β -диапазоне рассматривается как отражение механизмов поддержания статуса-кво текущего сенсомоторного и когнитивного состояния [10]. Во время состояния подготовки движения наблюдается возрастание β -активности, которое снижается в момент совершения произвольного движения. Предположительно, данная β -активность является отражением процесса одновременного выполнения текущей моторной программы и подготовки нового движения [10]. Так при выполнении задачи *Go/NoGo* успешные *NoGo* пробы сопровождаются возрастанием активности в β -диапазоне в нижней лобной коре и наблюдается менее выраженное снижение β -активности, связанной с ответом, в первичной моторной коре [11].

Относительно когнитивных процессов *A.K. Engel* и *P. Fries* [10] предположили, что возрастание активности в β -диапазоне зависит от типа *top-down* сигнала, т.е. β -активность может возрастать, если поддержание текущего состояния имеет приоритет перед новыми сигналами (и потенциально новыми сигналами-дистракторами).

В большинстве исследований, посвященных изучению субъективной оценки длительности временных интервалов, в качестве экспериментальной парадигмы используют либо задачу на оценку длительности, либо выполнение испытуемым двух конкурентных задач (*dual-task*): задачу оценивать длительность временных интервалов и задачу, не связанную с оценкой времени [1, 12]. Во время выполнения двух конкурентных задач возникает феномен интерференции, выражающийся в том, что одна задача (или обе) выполняется хуже по сравнению с условиями, когда испытуемый выполняет ее без дополнительной нагрузки. Этот эффект объясняют ограниченностью

ресурсов внимания [13]. Исследования с использованием конкурентных задач показали, что при большем привлечении внимания к задаче, не связанной со временем, наблюдается недооценка временных интервалов, в том случае, когда испытуемого просят дать вербальную оценку [12].

В настоящее время в исследовательских работах, посвященных изучению восприятия времени, авторы обращаются к относительно коротким временным интервалам (несколько секунд), однако особенности оценки более длительных интервалов (минуты) изучены недостаточно [1]. Также в своей повседневной деятельности человек обычно выполняет когнитивные задачи в течение нескольких минут, поэтому в настоящем исследовании мы обратились именно к вопросу о субъективной оценке длительности времени выполнения какой-либо когнитивной задачи и ее психофизиологических коррелят. Испытуемые выполняли различные по длительности блоки проб задачи *Go/NoGo* и затем они оценивали время их выполнения. Так как предыдущие исследования [8, 9] показали ЭЭГ-корреляты оценки коротких временных интервалов в β -частотном диапазоне, мы также обратились к данному диапазону. Мы предположили, что и при оценке более длинных временных интервалов будут наблюдаться те же феномены, что были обнаружены *T.W. Kononowicz* и *H. van Rijn* [8]: переоценка длительности выполнения задачи будет сопровождаться большей мощностью ЭЭГ-сигнала в диапазоне 13–30 Гц.

МЕТОДИКА

В исследовании принимали участие 13 чел. (5 мужчин и 8 женщин, средний возраст составил 25.64 ± 0.61), все имели ведущую правую руку, согласно самоотчету и результатам опросника *M. Annett* [14], с нормальным или скорректированным зрением.

Испытуемые выполняли задачу *Go/NoGo* (рис. 1). Стимулы предъявляли на 22" ЖК мониторе с разрешением 1920×1080 пикселей, расположенном на расстоянии 60 см от глаз. При выполнении данного теста испытуемый при императивном "разрешающем" сигнале должен был совершать какое-либо действие, при "запрещающем" сигнале, напротив, тормозить совершение данного действия. Каждый испытуемый выполнял два варианта задачи *Go/NoGo*, которые различались требуемой от него реакцией. В начале каждой пробы испытуемого инструктировали фиксировать взор на центральном стимуле-крестике. В первом варианте данного теста испытуемых инструктировали совершать саккаду на периферический стимул (крестик) при предъявлении императивного сигнала, а при предъявлении "запрещающего" сигнала — продолжать фикси-

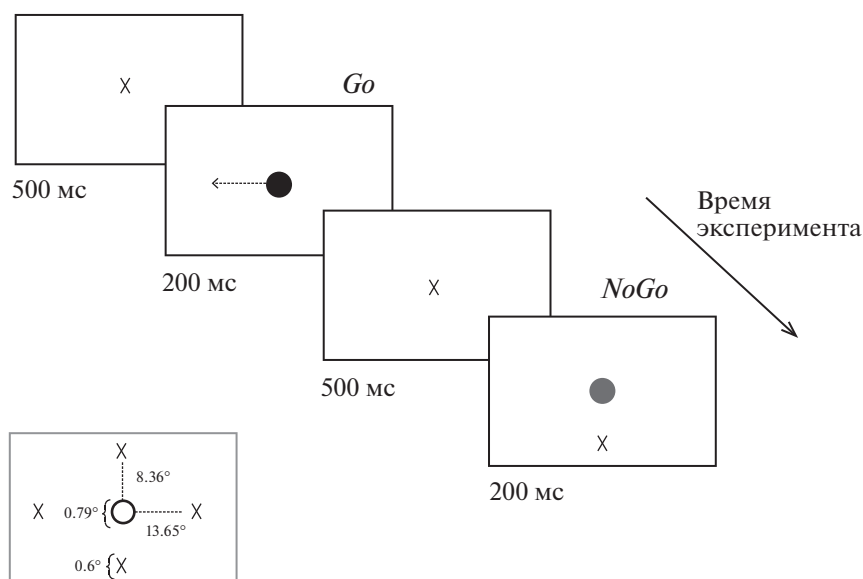


Рис. 1. Схема предъявления стимулов задаче *Go/NoGo*.

Совершение саккады на периферический стимул при предъявлении императивного сигнала (релевантное действие) показано стрелкой.

ровать взгляд на центральном стимуле. Во втором варианте задачи *Go/NoGo* испытуемые должны были нажимать на клавишу (одну из четырех стрелочек на клавиатуре), соответствующую положению периферического стимула, при предъявлении “разрешающего” сигнала, а при предъявлении “запрещающего” — не совершать никаких действий. Императивным сигналом являлся цвет центрального стимула. Для половины испытуемых (с нечетными порядковыми именами) “разрешающим” сигналом был красный круг, для другой половины (с четными номерами) — черный. Каждый вариант задачи *Go/NoGo* состоял из четырех блоков проб, разной длительности (331, 429, 545 и 827 с; блоки содержали следующее количество проб: блок 331 с — 261 проба, блок 429 с — 329 проб, блок 545 с — 405 проб и блок 827 с — 602 пробы), которые предъявляли в псевдослучайном порядке, уникальном для каждого испытуемого. После выполнения каждого блока проб испытуемый давал вербальную оценку длительности блока. Инструкцию испытуемому давали устно перед началом эксперимента, что после каждого выполненного блока проб он должен будет дать оценку длительности всего блока проб с точностью до секунды и записать свой ответ на бланк, который ему давали по окончании каждой пробы (для каждой пробы использовали отдельный бланк). Данное исследование включает в себя данные 84 блоков проб задачи *Go/NoGo*.

Во время выполнения задачи регистрировали монополярную ЭЭГ от 8 мостиковых электродов (*Ag/AgCl*), расположенных по системе “10–20%” (стандартные отведения $F_3, F_4, C_3, C_4, P_3, P_4, O_1, O_2$),

относительно объединенного ушного электрода (*Ag/AgCl*). Для регистрации ЭЭГ использовали аппаратно-программный комплекс “Мицар-ЭЭГ-202” (ООО “Мицар”, Россия), включающий 32-канальный электроэнцефалограф и программу *WinEEG*.

Регистрацию биопотенциалов осуществляли в диапазоне 0–150 Гц, для фильтрации сетевой наводки применяли режекторный фильтр для диапазона частот 45–55 Гц. Частота оцифровки биопотенциалов составляла 500 Гц. Во время эксперимента испытуемый находился в положении сидя, его голову не жестко фиксировали при помощи подбородной подставки.

Анализ данных производили в программной среде *Matlab* (*The Mathworks, Inc., Natic, MA*) с использованием программы *EEGLAB* [15]. При анализе ЭЭГ производили: цифровую фильтрацию исходных сигналов на частоте 2–30 Гц, выделение эпох сигналов (длина эпохи 4 с, эпохи “нарезали” подряд, без перекрытия). Исключение артефактов от движений глаз осуществляли методом независимых компонент (*ICA*). Также посредством визуального анализа исключали эпохи с амплитудой потенциалов более 100 мкВ: 55 432 эпохи длительностью 4 с и нарезались подряд без перекрытия от отметки начала выполнения блока проб до отметки конца выполнения, после удаления артефактов осталось 63.5% эпох от общего числа. Вычисление спектров производили по методу *P.D. Welch* [16]. Спектры рассчитывали для каждой выделенной эпохи: вычисляли усредненную спектральную мощность потенциалов ЭЭГ (мкВ²) в диапазонах 13–30 и 2–30 Гц,

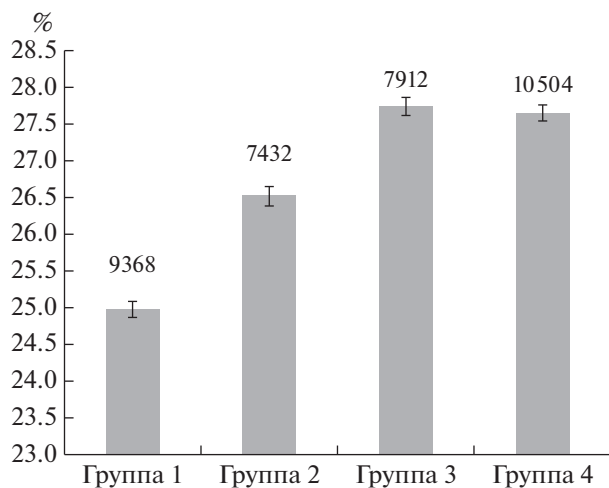


Рис. 2. Значение усредненной относительной спектральной мощности (%) в β -диапазоне (13–30 Гц) по группам субъективной оценки длительности блока проб задачи *Go/NoGo*, согласно квартилям распределения оценок.

Цифры над столбиками указывают количество эпох, вошедших в данную группу.

затем вычисляли относительную спектральную мощность в диапазоне 13–30 Гц относительно мощности всего спектра (2–30 Гц). Ввиду того, что каждый испытуемый давал оценку временным интервалам только четырежды (после выполнения каждого блока проб), для индивидуального анализа было бы недостаточно данных по субъективной оценке интервалов. Поэтому для статистической обработки данных применяли групповой метод анализа. Также для описания каких-либо общих феноменов целесообразно проводить анализ именно агрегированных усредненных данных. Статистическую обработку данных производили в программе *R Studio* (версия 3.5.1) и применяли линейную смешанную модель (*linear mixed model*). В качестве зависимой переменной выступали значения относительной спектральной мощности в диапазоне 13–30 Гц. Фиксированными факторами (*fixed factors*) являлись: “отведение” (F_1 , с уровнями “лобные”, “центральные”, “теменные” и “затылочные”), “латерализация” (F_2 , с уровнями “правое полушарие” и “левое полушарие”) и “субъективная оценка временных интервалов” (F_3 , с уровнями, соответствующими квартилям распределения субъективных оценок временных интервалов – подробнее см. Результаты исследования), а также взаимодействие факторов “отведение-субъективная оценка временных интервалов” (F_{13}) и факторов “латерализация-субъективная оценка временных интервалов” (F_{23}) на дисперсию данных относительной спектральной мощности в диапазоне 13–30 Гц. В качестве случайного фактора

(*random factor*) рассматривали фактор “испытуемый” (число уровней фактора было равно числу испытуемых). Парные сравнения проводили с использованием *t*-критерия Стьюдента с поправкой Бонферони.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве единицы субъективной оценки временных интервалов мы принимали разность длительности одного блока проб задачи *Go/NoGo* и субъективной оценки его длительности испытуемым. Медианное значение субъективных оценок составило 74.5 с, первый квартиль распределения – 67 с, третий квартиль – 208.5 с. Для дальнейшего анализа все блоки проб были разделены на 4 группы, согласно квартилям распределения субъективных оценок: группа 1 – до первого квартиля (переоценка временных интервалов), группа 2 – от первого квартиля до медианы (вошли наиболее точные оценки временных интервалов), группа 3 – данные от медианы до третьего квартиля (недооценка временных интервалов), группа 4 – данные выше третьего квартиля (недооценка временных интервалов).

Применение линейной смешанной модели (*linear mixed model*) позволило выявить высокодоверенные влияния всех исследуемых факторов на дисперсию данных относительной спектральной мощности в диапазоне 13–30 Гц. Влияние факторов “отведение” ($F_{13,35168} = 80.73, p < 0.001$) и “латерализация” ($F_{21,35168} = 18.61, p < 0.001$) свидетельствовало о разной степени вовлеченности разных областей мозга при выполнении задачи *Go/NoGo* в условиях необходимости последующей оценки ее длительности. Достоверное влияние фактора “субъективная оценка временных интервалов” ($F_{33,27785} = 108.12, p < 0.001$) подтверждает то, что субъективная оценка временных интервалов находит свое отражение в динамике электрической активности мозга в диапазоне 13–30 Гц. Влияние взаимодействия факторов “латерализация” и “субъективная оценка временных интервалов” ($F_{233,35168} = 7.52, p < 0.001$), а также взаимодействия факторов “отведение” и “субъективная оценка временных интервалов” ($F_{139,35168} = 6.53, p < 0.001$) говорит о разной степени активности полушарий и разных областей мозга во время выполнения задачи *Go/NoGo* при разной точности последующей субъективной оценки ее длительности.

Переоценка временных интервалов (группа 1) сопровождается достоверно меньшей относительной спектральной мощностью в β -диапазоне (рис. 2), чем наиболее точная оценка временных интервалов и их недооценка (табл. 1).

Недооценка временных интервалов (группа 3 и группа 4) сопровождается большей относитель-

Таблица 1. Сравнение средней относительной спектральной мощности в диапазоне 13–30 Гц по группам субъективной оценки длительности блока проб задачи *Go/NoGo*, согласно квартилям распределения оценок

Усредненная относительная мощность ЭЭГ (%)	Группа 1	Группа 2	Группа 3	Группа 4
Группа 1	24.99 ± 0.11			
Группа 2	–9.12 15153 <0.001	26.53 ± 0.13		
Группа 3	–16.95 16330 <0.001	–6.78 152220 <0.001	27.75 ± 0.12	
Группа 4	–17.06 19853 <0.001	–6.49 16313 <0.001	–0.53 17608 = 0.594	27.66 ± 0.11

Примечание: полужирным выделены средние значения относительной спектральной мощности и ошибка среднего; в остальных ячейках сверху вниз указаны значения *t*-критерия Стьюдента, количество степеней свободы (*df*) и уровня значимости (*p*).

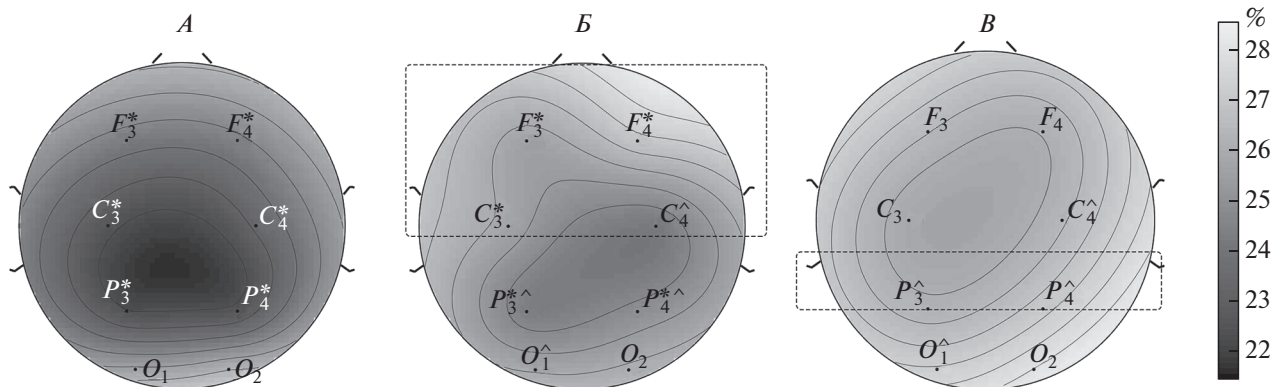
ной спектральной мощностью в β -диапазоне по сравнению с группой наиболее точной оценки временных интервалов. Так как достоверных различий в уровне относительной спектральной мощности в группе 3 и группе 4, обнаружено не было, для дальнейшего анализа эти данные были объединены в одну группу. Таким образом, анализировали динамику относительной спектральной мощности в диапазоне 13–30 Гц для трех группы проб: переоценка временных интервалов, наиболее точная оценка временных интервалов и недооценка.

Недооценка временных интервалов сопровождается достоверно большей относительной спектральной мощностью в β -диапазоне во всех отведениях по сравнению с переоценкой временных интервалов (рис. 3, 4, табл. 2), а также досто-

верно большей относительной спектральной мощностью в β -диапазоне в теменных отведениях, в центральном отведении правого полушария и затылочном отведении левого полушария по сравнению с группой наиболее точной оценки временных интервалов (рис. 3, 4).

Асимметрия относительной спектральной мощности в β -диапазоне при недооценке временных интервалов наблюдается в теменных отведениях (табл. 2).

Переоценка временных интервалов сопровождается достоверно меньшей относительной спектральной мощностью в β -диапазоне в лобных и теменных отведениях, а также в центральном отведении левого полушария по сравнению с группой наиболее точной оценки временных интервалов (рис. 4).

**Рис. 3.** Усредненная относительная мощность ЭЭГ (%) в β -диапазоне.

A – переоценка временных интервалов, *B* – наиболее точная оценка временных интервалов, *V* – недооценка временных интервалов. Пунктиром показаны области достоверных межполушарных различий, звездочкой (*) – достоверные различия при сравнении переоценки временных интервалов и группы наиболее точной оценки, подчеркиванием (—) – достоверные различия при сравнении групп переоценки и недооценки временных интервалов, галочкой (^) – достоверные различия при сравнении группы переоценки временных интервалов и группы наиболее точной оценки временных интервалов.

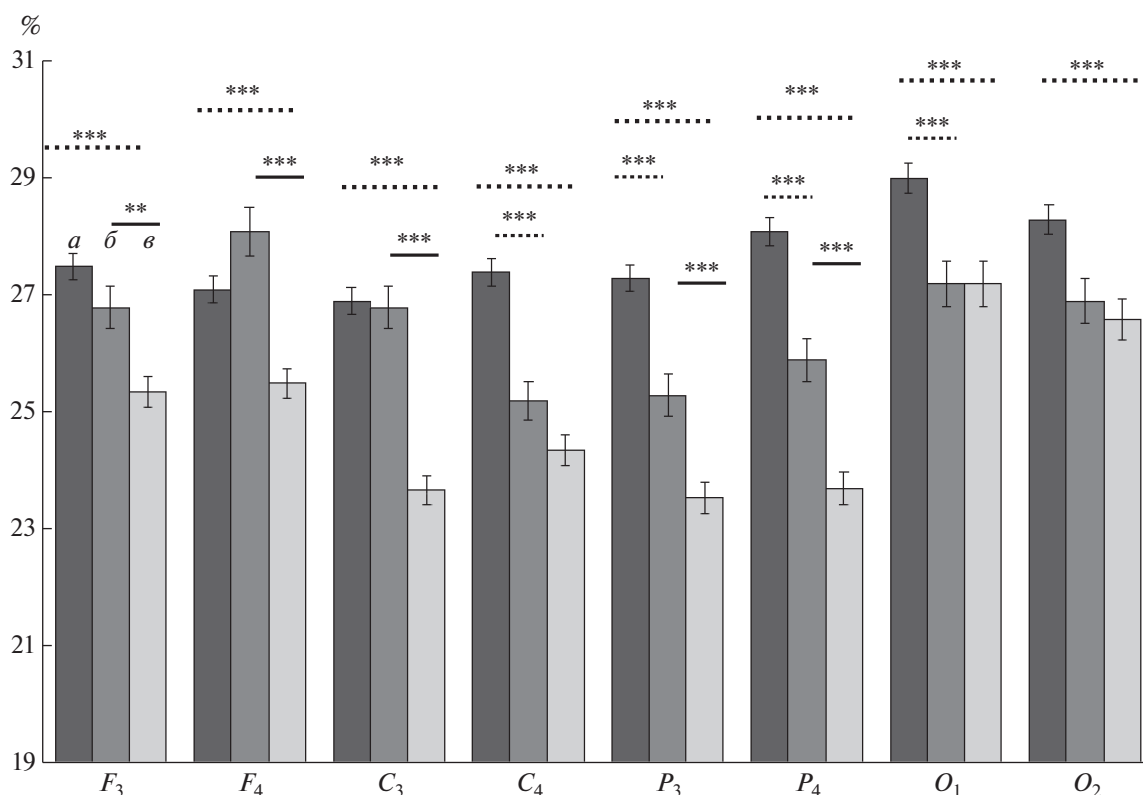


Рис. 4. Усредненная относительная мощность ЭЭГ (%) в β -диапазоне по отведениям.

Разбросами показана ошибка среднего. *a* – группа недооценки временных интервалов, *b* – группа наиболее точной оценки временных интервалов, *v* – группа переоценки временных интервалов. Достоверные различия (при $p < 0.008$) показаны звездочками (** – $p < 0.01$, *** – $p < 0.001$). Сплошная линия – сравнение групп наиболее точной оценки и переоценки временных интервалов, пунктирная линия – сравнение групп наиболее точной оценки и недооценки временных интервалов, двойная пунктирная линия – сравнение групп переоценки и недооценки временных интервалов.

Достоверных межполушарных различий при переоценке временных интервалов обнаружено не было (табл. 2). При наиболее точной оценке временных интервалов достоверные межполушарные различия наблюдаются в лобных и центральных отведениях (табл. 2).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты нашего исследования, как и работы *T.W. Kononowicz*, *H. van Rijn* [8] и *M. Wiener* [9] показали, что субъективная оценка временных интервалов находит свое отражение в динамике мощности ЭЭГ в β -диапазоне. Однако мы полу-

Таблица 2. Сравнение средней относительной спектральной мощности в β -диапазоне в левом и правом полушарии для групп недооценки, переоценки и наиболее точной оценки временных интервалов

Отведения	Недооценка		“Точная” оценка		Переоценка	
	правое	левое	правое	левое	правое	левое
<i>F</i>	27.1 ± 0.23	27.5 ± 0.23	28.1 ± 0.41	26.8 ± 0.35	25.5 ± 0.25	25.35 ± 0.26
	$t = -1.15, df = 4601, p = 0.25$		$t = 2.54, df = 1819, p < 0.05$		$t = 0.55, df = 2339, p = 0.584$	
<i>C</i>	27.4 ± 0.23	26.9 ± 0.23	25.2 ± 0.33	26.8 ± 0.36	24.35 ± 0.26	23.68 ± 0.25
	$t = 1.65, df = 4598, p = 0.1$		$t = -3.28, df = 1847, p < 0.001$		$t = 1.86, df = 2337, p = 0.063$	
<i>P</i>	28.1 ± 0.24	27.3 ± 0.23	25.9 ± 0.37	25.3 ± 0.36	23.7 ± 0.29	23.54 ± 0.28
	$t = 2.51, df = 4600, p = 0.012$		$t = 1.13, df = 1855, p = 0.259$		$t = 0.41, df = 2330, p = 0.682$	
<i>O</i>	28.3 ± 0.25	29.0 ± 0.26	26.9 ± 0.38	27.2 ± 0.39	26.6 ± 0.35	27.2 ± 0.39
	$t = 1.96, df = 4591, p = 0.05$		$t = 0.45, df = 1855, p = 0.651$		$t = 1.04, df = 2312, p = 0.3$	

Примечание: полужирным выделены достоверные межполушарные различия.

чили противоположный результат исследованию *T.W. Kononowicz* и *H. van Rijn* [8]: недооценка временных интервалов в нашем исследовании сопровождалась большей относительной спектральной мощностью в β -диапазоне по сравнению с переоценкой временных интервалов (рис. 2–4), а также по сравнению с группой наиболее точной оценки временных интервалов. Полученный результат можно объяснить тем, что была использована другая экспериментальная парадигма и испытуемые давали оценку более длинным временным интервалам.

Так как система оценки и восприятия времени, скорее всего, состоит из разных нейронных сетей [3], то можно предположить, что при воспроизведении длительности 2.5 с и вербальной оценки длительности выполненной задачи, физическое время которой было 331–827 с, вовлекаются разные структуры мозга.

Несмотря на то, что используемая нами экспериментальная парадигма не представляет собой выполнение двух конкурентных задач (*dual-task*) в классическом ее варианте [1, 12, 13], можно предположить, что сама инструкция не только выполнить задачу *Go/NoGo*, но и оценить ее длительность, все-таки создает две конкурирующие когнитивные задачи.

Большую относительную спектральную мощность при недооценке временных интервалов можно объяснить тем, что в этих блоках проб приоритет имела задача *Go/NoGo* и на ее выполнение привлекалась большая часть ресурсов внимания, а также ресурсы были направлены на поддержание текущего состояния концентрации на этой задаче [10–12]. Таким образом, в виду недостатка ресурсов внимания к задаче оценки временного интервала возникла их субъективная недооценка. Наблюдаемая большая относительная спектральная мощность в β -диапазоне для блоков проб, длительность которых была недооценена, может быть объяснена высоким уровнем поддержания статуса-кво [10]. Асимметрия с преобладанием правого полушария, наблюдаемая в теменных отведениях при недооценке времени выполнения блока проб задачи *Go/NoGo*, может быть объяснена тем, что в оценку времени преимущественно была вовлечена система имплицитного тайминга [2].

Разная активность полушарий наблюдалась также и в группе наиболее точной оценки временных интервалов: большая мощность наблюдалась в правом лобном отведении по сравнению с левым лобным отведением и в левом центральном отведении по сравнению с правым. Наблюдаемую картину можно объяснить тем, что при точной оценке временных интервалов вовлекалась преимущественно система эксплицитного тайминга, т.е. испытуемый сознательно пытался

отмечать течение времени [2]. Таким образом, предположительно, большее количество ресурсов было направлено на задачу дать оценку длительности выполнения задачи *Go/NoGo* по сравнению с группой недооценки временных интервалов, что способствовало тому, что меньше ресурсов было вовлечено на выполнение задачи *Go/NoGo* и на поддержание состояния концентрации на ней, что выразилось в меньшей относительной спектральной мощности в β -диапазоне.

Важно отметить, что наибольшие различия по мощности β -диапазона между исследуемыми тремя группами наблюдались в центральных и теменных отведениях (рис. 3, 4). Можно предположить, что такой результат связан с активностью дополнительного моторного поля (*SMA*), которое вовлечено в субъективную оценку временных интервалов [4, 5].

Переоценка временных интервалов характеризуется наименьшей относительной спектральной мощностью в β -диапазоне по сравнению с группой наиболее точной оценки и группой недооценки временных интервалов и отсутствием достоверных межполушарных различий. Эти результаты можно объяснить тем, что на поддержание состояния концентрации на задаче было затрачено меньше ресурсов по сравнению с другими группами, вероятно, ввиду низкого интереса испытуемого к задаче или его усталости.

Таким образом, в последующих исследованиях целесообразно учесть состояние усталости испытуемого, а также исследовать влияние мотивации участников эксперимента, вознаграждением за успешное выполнение либо задачи *Go/NoGo*, либо задачи оценки временных интервалов. В данном исследовании мы не учитывали количество релевантных и нерелевантных ответов при выполнении задачи *Go/NoGo*, однако это планируется осуществить в последующих работах. Так как полученный результат прямо противоположен другим исследованиям, обнаружившим ЭЭГ-корреляты субъективной оценки временных интервалов [8, 9], то данная проблема требует дальнейших исследований и проведения сравнительных экспериментов. Используемая нами методика также может быть дополнена глазодвигательными показателями [17].

ВЫВОДЫ

1. Субъективная оценка времени выполнения блока проб задачи *Go/NoGo* находит свое отражение в динамике относительной спектральной мощности в β -диапазоне.

2. Задачу *Go/NoGo* с инструкцией испытуемому, оценить время выполнения блока проб, можно рассматривать как выполнение двух конкурентных задач (*dual-task*).

3. Различия в динамике электрической активности мозга при разной оценке временных интервалов можно объяснить разным распределением ресурсов внимания при выполнении двух конкурентных задач, а также разным соотношением вовлечения систем эксплицитного и имплицитного тайминга.

Этические нормы. Все исследования проведены в соответствии с принципами биомедицинской этики, сформулированными в Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующих обновлениях, и одобрены локальным биоэтическим комитетом Биологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова (Москва).

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

Благодарности. Авторы выражают свою благодарность испытуемым, принявшим участие в исследовании, а также Федору Борисовичу Хлебникову за помощь в создании программ и дополнительного оборудования для экспериментальной работы.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Grondin S.* Timing and time perception: A review of recent behavioral and neuroscience findings and theoretical directions // *Atten. Percept. Psychophys.* 2010. V. 72. № 3. P. 561.
2. *Ameqrane I., Pouget P., Wattiez N. et al.* Implicit and explicit timing in oculomotor control // *PLoS One.* 2014. V. 9. № 4. e93958.
3. *Eagleman D.M., Tse P.U., Buonomano D. et al.* Time and the Brain: How Subjective Time Relates to Neural Time // *J. Neurosci.* 2005. V. 25. № 45. P. 10369.
4. *Kononowicz T.W., Van Rijn H.* Slow Potentials in Time Estimation: The Role of Temporal Accumulation and Habituation // *Front. Integr. Neurosci.* 2011. V. 5. P. 1.
5. *Merchant H., Harrington D.L., Meck W.H.* Neural Basis of the Perception and Estimation of Time // *Annu. Rev. Neurosci.* 2013. V. 36. № 1. P. 313.
6. *Kunimatsu J., Suzuki T.W., Ohmae S., Tanaka M.* Different contributions of preparatory activity in the basal ganglia and cerebellum for self-timing // *Elife* 7. 2018. V. 7. № e35676. P. 1.
7. *Brown S.W., Collier S.A., Night J.S.* Timing and executive resources: Dual-task interference patterns between temporal production and shifting, updating, and inhibition tasks // *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.* 2013. V. 39. № 4. P. 947.
8. *Kononowicz T.W., Van Rijn H.* Single trial beta oscillations index time estimation // *Neuropsychologia.* 2015. V. 75. P. 381.
9. *Wiener M., Parikh A., Krakow A., Coslett H.B.* Causal role of beta oscillations in time estimation // *bioRxiv.* 2017. P. 1. <https://doi.org/10.1101/165233>
10. *Engel A.K., Fries P.* Beta-band oscillations—signalling the status quo? // *Curr. Opin. Neurobiol.* 2010. V. 20. № 2. P. 156.
11. *Swann N., Tandon N., Canolty R. et al.* Intracranial EEG Reveals a Time- and Frequency-Specific Role for the Right Inferior Frontal Gyrus and Primary Motor Cortex in Stopping Initiated Responses // *J. Neurosci.* 2009. V. 29. № 40. P. 12675.
12. *Brown S.W., Collier S.A., Night J.S.* Timing and executive resources: Dual-task interference patterns between temporal production and shifting, updating, and inhibition tasks // *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.* 2013. V. 39. № 4. P. 947.
13. *Matthews W., Meck W.* Temporal Cognition: Connecting Subjective Time to Perception, Attention, and Memory // *Psychol. Bull.* 2016. V. 142. № 8. P. 865.
14. *Annett M.* A classification of Hand Preference By Association Analysis // *Br. J. Psychol.* 1970. V. 61. № 3. P. 303.
15. *Brunner C., Delorme A., Makeig S.* EEGLAB an open source MATLAB toolbox for electrophysiological research // *Biomed Tech.* 2013. V. 58. № 1. P. 24.
16. *Welch P.D.* The use of fast fourier transform for the estimation of power spectra: a method based on time averaging over short, modified periodograms // *IEEE Trans. Audio Electroacoust.* 1967. V. 15. № 2. P. 70.
17. *Константинова М.В., Анисимов В.Н., Терещенко Л.В., Латанов А.В.* Связь зрительного внимания и субъективного восприятия времени // *Журн. высш. нервн. деят.* 2018. Т. 68. № 5. С. 582.

EEG Spectral Power in the Beta-Range Reflects the Subjective Assessment of Go/NoGo Task Execution Time

M. V. Konstantinova^{a, *}, V. N. Anisimov^a, A. V. Latanov^a

^aLomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

*E-mail: konstantinova@neurobiology.ru

We analysed the subjective time estimation of task duration using EEG during a series of Go/NoGo tasks with varying duration. All series of tasks were divided into three groups according to quartiles of distribution of subjective duration estimation. The were the groups of “overestimation”, “most precise estimation” and “under-

estimation” of task duration. The underestimation of task duration was associated with greater relative spectral power in the beta-range (13–30 Hz) as compared with other groups. Moreover, the underestimation of task duration was characterized by interhemispheric asymmetry of relative spectral power in the beta-range in parietal areas. The group of most precise estimation of task duration was associated with greater relative spectral power as compared with overestimation group and characterized by interhemispheric asymmetry in frontal and central brain areas. Thus, the subjective estimation of duration during a series of Go/NoGo task have EEG-correlates in relative spectral power in beta frequency range.

Keywords: EEG, time interval estimation, Go/NoGo task, relative spectral power.