

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

ПОТЕНЦИАЛЫ, СВЯЗАННЫЕ С СОБЫТИЯМИ, В Go/NoGo ТЕСТЕ  
КАК ВОЗМОЖНЫЕ НЕЙРОМАРКЕРЫ МОНОТОНИИ

© 2023 г. М. В. Пронина<sup>1</sup>, \*, М. Г. Старченко<sup>1</sup>, Ю. А. Бойцова<sup>1</sup>, А. А. Богдан<sup>1</sup>,  
Ю. Г. Хоменко<sup>1</sup>, Г. В. Катаева<sup>1</sup>, Ю. А. Шичкина<sup>1</sup>, Ю. Д. Кропотов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ”,  
Санкт-Петербург, Россия

\*E-mail: marina.v.pronina@gmail.com

Поступила в редакцию 01.09.2023 г.

После доработки 15.10.2023 г.

Принята к публикации 16.10.2023 г.

Монотония возникает при выполнении малосодержательной и однообразной работы, в том числе, работы оператора. Она сопровождается снижением концентрации внимания и скорости его переключения, замедлением процессов восприятия и двигательных реакций, что может привести к потере бдительности, самоконтроля и возникновению сонливости и, следовательно, повышению рисков производственных травм и аварий. В связи с этим актуальной задачей является разработка методов мониторинга состояния человека в процессе выполнения монотонной деятельности. В работе исследовалось влияние монотонии на волны потенциалов, связанных с событиями (ПСС), в Go/NoGo тесте с предупреждающим стимулом. Анализировались данные 31-канальной ЭЭГ 25 здоровых испытуемых, зарегистрированной до и после выполнения четырех зрительных тестов общей продолжительностью около 1.5 ч, представляющих собой однотипные задания с различными инструкциями и моделирующих условия монотонной работы. После выполнения четырех тестов было обнаружено повышение волны P2, снижение волн P3 Cue и условного негативного отклонения (УНО; волна ожидания), регистрируемых после предъявления предупреждающего стимула, а также снижение волны P300, наблюдаемой после предъявления NoGo стимула. Результаты, полученные в данной работе, по-видимому, отражают ослабление проактивного и реактивного когнитивного контроля при монотонии и позволяют рассматривать волны P2, P3 Cue, P3 NoGo и волну ожидания как возможные кандидаты на роль нейромаркеров монотонии, что делает перспективным использование этих показателей в системах мониторинга состояния человека во время выполнения операторской работы.

*Ключевые слова:* потенциалы, связанные с событиями, Go/NoGo тест, монотония, когнитивный контроль, волна P300, волна P2, условное негативное отклонение

DOI: 10.31857/S0869813923120087, EDN: CHYYXJ

## ВВЕДЕНИЕ

В современном мире в связи с развитием автоматизации всех сфер производства остро встает проблема мониторинга эмоционального и когнитивного состояния человека-оператора для предотвращения производственных травм и аварий. Особую опасность представляет собой такое функциональное состояние, как монотония. Она возникает при выполнении монотонной, то есть однообразной и малосо-

держательной работы, при которой одни и те же действия повторяются с определенной цикличностью. При монотонии снижается сознательный контроль за выполнением деятельности [1]. Принято выделять двигательную монотонию, вызванную повторением однообразных действий, и сенсорную, связанную с однообразием поступающих сигналов. Эмоционально монотония может переживаться человеком как скука, апатия, усталость, безразличие к выполняемой работе или нежелание выполнять ее. С точки зрения когнитивных функций наблюдается снижение концентрации внимания и скорости его переключения, замедление процессов восприятия и двигательных реакций, что может привести к потере бдительности, самоконтроля и возникновению сонливости (дремотного состояния) и, следовательно, повышению рисков производственных травм и аварий. В связи с этим поиск объективных физиологических маркеров состояния монотонии по-прежнему остается высокоактуальной задачей.

Поскольку монотонная работа, как и всякая другая, вызывает усталость и утомление, существует две точки зрения на эту проблему. Отечественные ученые в основном рассматривают монотонию и утомление как разные функциональные состояния. Их отличие состоит в том, что утомление возникает, главным образом, при тяжелой работе, или, если речь идет об умственном утомлении, то при интенсивной интеллектуальной деятельности, связанной с большим потоком информации и временными ограничениями на выполнение деятельности, а монотония может возникать и при выполнении легкой, неустомительной работы. При прекращении однообразной работы монотония исчезает, тогда как для исчезновения утомления просто прекращения работы недостаточно, требуется отдых. Зарубежные авторы склонны рассматривать монотонию как разновидность утомления, в первую очередь, умственного [2]. Различают активное умственное утомление, вызванное высокими требованиями деятельности и перегрузкой, и пассивное – собственно монотонию [3, 4].

Значительная часть исследований нейрофизиологических коррелят состояния монотонии выполнена с помощью ЭЭГ, но их результаты неоднозначны. Корреляты монотонии связывают с большим количеством ритмов. Так, показана связь монотонии с повышением мощности альфа-ритма [5–7], повышением мощности тета-ритма [7] и снижением мощности бета-ритма [8, 9]. Однако в других исследованиях показано существование специфического ЭЭГ-паттерна монотонии, характеризующегося одновременным повышением мощности тета-, альфа- и бета-ритмов [10, 11], который интерпретируется как наличие двух противоположных тенденций – снижение функциональной активности областей коры, которые не участвуют в выполнении текущей задачи, и одновременно поддержание активности тех мозговых областей, которые вовлечены в реализацию деятельности.

Снижение концентрации внимания и скорости его переключения, замедление скорости процессов восприятия и двигательных реакций, наблюдаемые при развитии монотонии или утомления, могут быть следствием ухудшения работы мозговой системы когнитивного контроля, которая регулирует и координирует целенаправленное поведение для обеспечения адаптации к изменяющимся условиям окружающей среды [12]. В частности, эта система обеспечивает такие операции, как селекцию, планирование и подавление действий, детекцию конфликта между возможными вариантами действий и подстройку дальнейшего поведения для избегания конфликтов [13]. С точки зрения поиска нейрофизиологических маркеров, потенциалы, связанные с событиями (ПСС), могут являться более перспективным инструментом для выявления состояния монотонии, чем ЭЭГ, поскольку по данным предыдущих исследований они позволяют оценить работу процессов системы когнитивного контроля [13, 14].

Модель дуальных механизмов когнитивного контроля [15] предполагает, что когнитивный контроль реализуется в двух разнесенных во времени процессах: проактивном и реактивном, между которыми человек может переключаться. Проактивный контроль обеспечивает поддержание целей, связанных с задачей, до предъявления стимулов, требующих реакции, и включает в себя такие гипотетические операции, как постановка задачи, ориентирование на стимул и задействование рабочей памяти [14]. Предполагается, что эти процессы отражаются в специфических волнах ПСС, таких как лобно-центральная волна N2 [16], условное негативное отклонение (УНО), или волна ожидания [17], и волна P3 Cue [18]. Реактивный контроль отвечает за реализацию или торможение подготовленного действия после предъявления ожидаемого стимула в зависимости от задачи, и включает в себя гипотетические операции активации связи стимул–реакция [19] подавления или переопределение двигательной программы [20] и обнаружения конфликта между возможными действиями [21]. Эти процессы предположительно отражаются в волнах ПСС P250, P3 Go, P3 NoGo и N2 [14].

Для создания условий, в которых задействуются процессы когнитивного контроля, широко используются тесты Go/NoGo парадигмы, в которых от испытуемых требуется как можно быстрее и точнее реагировать, например, нажатием на кнопку, на определенные стимулы (Go условие) и воздерживаться от ответа на другие (NoGo условие). Для оценки процессов проактивного контроля используются в том числе Go/NoGo тесты с предупреждающим стимулом, который с определенной долей вероятности указывает на то, что следующий стимул будет целевым. В таком случае проактивный контроль задействуется в интервале между предупреждающим и императивным стимулами, а реактивный – после предъявления императивного стимула. Предыдущие психофизиологические исследования показывают связь волн ПСС, зарегистрированных при выполнении подобных тестов, с гипотетическими операциями проактивного и реактивного когнитивного контроля [14].

В немногочисленных работах, исследующих состояние монотонии с помощью метода ПСС, было найдено снижение амплитуды волны ожидания [22, 23] и волны P300 [24, 25], а также увеличение латентности P300 [26]. Однако в других работах изменений амплитуды P300 после выполнения утомляющих тестов обнаружено не было [22, 27], поэтому поиск нейрофизиологических маркеров монотонии по-прежнему остается актуальной задачей.

Целью исследования было выявление изменений волн ПСС, отражающих процессы когнитивного контроля и регистрируемых в зрительном Go/NoGo тесте с предупреждающим стимулом, при развитии монотонии.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### *Испытуемые*

В работе анализировались данные 25 здоровых испытуемых в возрасте от 19 до 25 лет, 17 мужчин, все участники исследования являлись студентами Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета “ЛЭТИ”, не имели черепно-мозговых травм в анамнезе, психических, неврологических, онкологических и нейродегенеративных заболеваний, алкогольной и наркотической зависимости, не принимали психотропные препараты.

### *Психологическое тестирование*

В батарею методик психологического тестирования вошли следующие методики: опросники “Самочувствие–Активность–Настроение” (САН), “Актуальное со-

стояние” (АС), “Утомление–Пресыщение–Монотония–Стресс” (УПМС) и корректурная проба.

Опросник САН позволяет провести экспресс-оценку состояния индивида по трем шкалам самочувствия, активности и настроения испытуемого. Опросник состоит из 30 пар противоположных характеристик, по которым испытуемого просят оценить свое состояние. После подсчета баллов по каждой шкале результаты интерпретируются следующим образом: оценки ниже 4 баллов рассматриваются как неблагоприятное состояние испытуемого по соответствующей шкале, оценки, превышающие 4 балла, свидетельствуют о благоприятном состоянии испытуемого. В норме оценки состояния располагаются в диапазоне 5.0–5.5 баллов.

Опросник АС описывает уровень актуального психического состояния и те его особенности, которые могут быть обусловлены влиянием конкретных событий текущего момента (например, экзамен, долгое ожидание, плохое физическое самочувствие и т.д.). Опросник состоит из 38 утверждений, описывающих признаки, характеризующие актуальное состояние человека, группирующиеся в 5 шкал: 1) шкала “Ак”: “активация–деактивация”, 2) шкала “То”: “тонус: высокий–низкий”, 3) шкала “Са”: “самочувствие физическое: комфортное–дискомфортное”, 4) шкала “Сп”: “спокойствие–тревога”, 5) шкала “Во”: “возбуждение эмоциональное: низкое–высокое”. При подсчете баллов по каждой шкале они переводятся в стандартные Т-баллы и далее интерпретируются следующим образом: 55 и более Т-баллов – это повышенные оценки по той или иной шкале, 45 и менее Т-баллов – пониженные оценки.

Опросник УПМС оценивает выраженность 4 компонентов функционального состояния – утомления, пресыщения, монотонии и стресса – и состоит из 40 утверждений. После подсчета баллов по каждому компоненту они интерпретируются следующим образом – менее 18 баллов – означает невыраженность данного компонента, от 18 до 29 баллов – выраженность компонента, а более 30 баллов – сильная степень выраженности того или иного компонента.

Корректурная проба является широко используемой методикой для оценки целого ряда показателей, в частности, оценки функций системы внимания, а также для выявления признаков утомляемости. Корректурная проба в буквенном варианте проводилась в течение 5 мин, каждые 30 с испытуемый отмечал то место на бланке, где он работал в данный момент. Задачей для испытуемого было зачеркивать букву А и подчеркивать букву И. Подсчитывались следующие показатели – количество ошибок, пропусков и концентрация внимания.

Опросники САН, АС и корректурная проба предлагались испытуемым дважды – перед началом нейрофизиологического исследования и после его окончания. Опросник УПМС давался один раз – после окончания нейрофизиологического исследования. Также перед началом нейрофизиологического исследования, после выполнения каждого теста Go/NoGo и после окончания исследования оценивалась степень субъективного утомления испытуемого по шкале от 1 до 10, где 1 балл – отсутствие усталости, а 10 – максимальная степень усталости.

### *Тестовое задание*

Все испытуемые в одном и том же порядке выполняли шесть вариантов двустимульного зрительного теста в парадигме Go/NoGo (рис. 1). Было предположено, что выполнение в течение достаточно длительного времени тестов, требующих постоянного внимания к предъявляемым стимулам и совершения определенных действий в ответ на них, может рассматриваться как модель условий монотонной работы оператора.

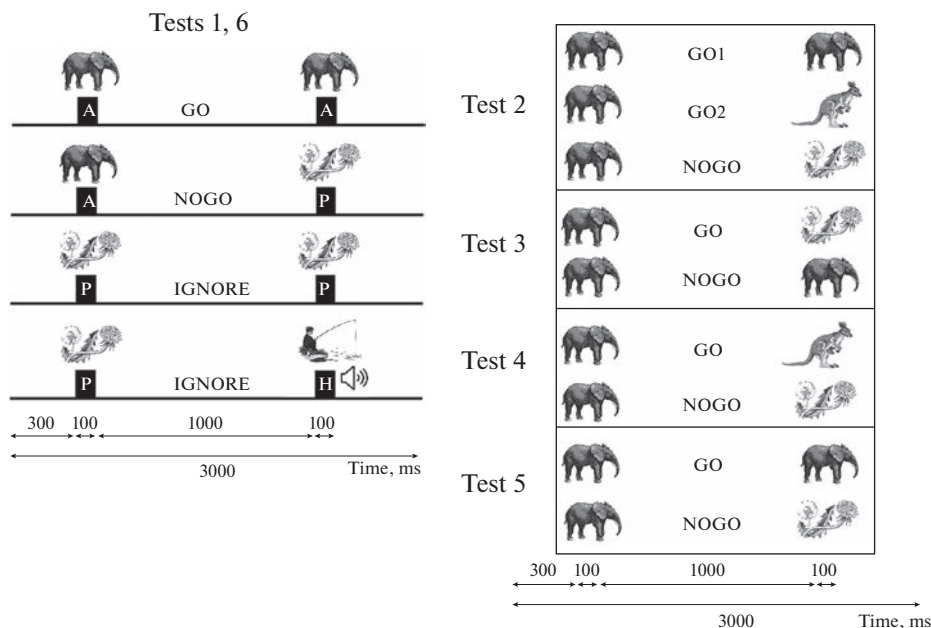


Рис. 1. Схема предъявления стимулов в Тестах 1–6. А (animal) – изображение животного, Р (plant) – изображение растения, Н (human) – изображение человека.

Первый и последний тесты в последовательности (Тест 1 и Тест 6) были идентичны и состояли из 400 проб, общей продолжительностью около 20 мин. Пробами являлись пары изображений в следующих сочетаниях: “животное–животное” (проба Go), “животное–растение” (проба NoGo), “растение–растение” (проба Ignore) и “растение–человек” (проба Novel). В пробах “животное–животное” и “растение–растение” первое и второе изображения были полностью идентичны. Одновременно с изображением человека предъявлялся звуковой сигнал со звуковым давлением около 70 дБ у головы испытуемого, представлявшим собой комбинацию тонов частотой 5000, 2500, 2000, 1500 и 1000 Гц в случайном порядке. Каждый тон длился 20 мс, суммарная длительность звукового сигнала составляла 100 мс. Изображения животных, растений и людей предъявлялись на экране ноутбука, слуховые стимулы – через динамики.

Разные типы проб подавались в случайном порядке с вероятностью 25%. Соответственно вероятность предъявления изображения животного или растения в качестве предупреждающего стимула составляла 50%. В свою очередь, изображение животного в качестве предупреждающего стимула обозначало, что с вероятностью 50% за ним последует изображение животного, на которое нужно будет ответить нажатием на кнопку (проба Go), или, также с вероятностью 50%, следующим будет изображение растения, на которое нужно будет воздержаться от ответа (проба NoGo).

Длительность проб составляла 3000 мс, престаимпульный интервал – 300 мс, длительность каждого стимула – 100 мс, длительность интервала между двумя стимулами в паре – 1000 мс, интервал между парами стимулов 1800 мс.

Испытуемым давалась инструкция нажимать на левую кнопку мыши указательным пальцем правой руки как можно быстрее, в случае предъявления пары картинок “животное–животное” и не нажимать на предъявление других пар стимулов.

Звуки, предъявляемые вместе с изображениями человека, испытуемых просили игнорировать.

Тесты 2–5 были подобны Тесту 1, временная структура проб была идентична, но в качестве стимулов использовались только изображения животных и растений, предъявляемых парами, и инструкции для испытуемых были различны (рис. 1). Общая продолжительность выполнения Тестов 2–5 составляла примерно 1.5 ч.

Тест 2 состоял из 600 проб, общей продолжительностью около 30 мин. В качестве проб использовались следующие варианты пар изображений: “животное–животное” с двумя одинаковыми изображениями (проба Go1), “животное–животное” с двумя разными изображениями (проба Go2), “животное–растение” (проба NoGo), “растение–растение” с двумя одинаковыми изображениями, “растение–растение” с двумя разными изображениями и “растение–животное”. Пробы подавались в случайном порядке с вероятностью ~17%. Испытуемому давалось задание нажимать указательным пальцем правой руки на левую кнопку мыши как можно быстрее в случае предъявления пары “животное–животное” с одинаковыми изображениями, нажимать средним пальцем правой руки на правую кнопку мыши в случае предъявления пары картинок “животное–животное” с разными изображениями и не нажимать на предъявление других пар стимулов.

Тест 3 состоял из 400 проб, общей продолжительностью около 20 мин. В качестве проб использовались следующие комбинации стимулов: “животное–животное” (проба Go), “животное–растение” (проба NoGo), “растение–растение”, и “растение–животное”, в пробах “животное–животное” и “растение–растение” первое и второе изображения были полностью идентичны. Пробы подавались в случайном порядке с вероятностью 25%. Испытуемому давалась инструкция нажимать на кнопку указательным пальцем правой руки как можно быстрее в случае предъявления пары “животное–растение” и не нажимать на предъявление других пар стимулов.

Тест 4 состоял из 400 проб, общей продолжительностью около 20 мин. Пробами являлись пары зрительных стимулов: “животное–животное” (проба Go), “животное–растение” (проба NoGo), “растение–растение” и “растение–животное”, в пробах “животное–животное” и “растение–растение” первое и второе изображения всегда различались. Пробы подавались в случайном порядке с вероятностью 25%.

Задачей испытуемых было нажимать на левую кнопку мыши указательным пальцем правой руки как можно быстрее в случае предъявления пары картинок “животное–животное” и не нажимать на предъявление других пар стимулов.

Тест 5 по стимульному материалу был идентичен тесту 3. Испытуемому давалась инструкция нажимать на левую кнопку мыши указательным пальцем правой руки как можно быстрее в случае предъявления пары “животное–животное” и не нажимать на предъявление других пар стимулов.

В общем выполнение всех шести Go/NoGo тестов занимало примерно 2 ч 10 мин, не считая перерывов. До и после выполнения тестов у испытуемых регистрировали фоновую ЭЭГ в течение 4 мин с открытыми глазами и в течение 4 мин – с закрытыми.

### *Регистрация ЭЭГ*

Для регистрации ЭЭГ использовался 32-канальный компьютерный электроэнцефалограф “Мицар-202” (CE 0537) производства ООО Мицар, (<http://www.mitsar-medical.com>) и электродный шлем МКС (производства ООО “Медицинские компьютерные системы”, Москва, Зеленоград) с 31 хлор-серебряным электродом, расположенным на поверхности головы в соответствии с неполной системой 10–10 в отведениях  $Fp_1$ ;  $Fp_2$ ;  $F_7$ ;  $F_3$ ;  $F_z$ ;  $F_4$ ;  $F_8$ ;  $FT_7$ ;  $FC_3$ ;  $FC_z$ ;  $FC_4$ ;  $FT_8$ ;  $T_3$ ;  $C_3$ ;  $C_z$ ;  $C_4$ ;  $T_4$ ;  $TP_7$ ;  $CP_3$ ;  $CP_z$ ;  $CP_4$ ;  $TP_8$ ;  $T_5$ ;  $P_3$ ;  $P_z$ ;  $P_4$ ;  $T_6$ ;  $O_1$ ;  $O_z$ ;  $O_2$ . Референтные электроды располагались на мочках ушей, а заземляющий – в лобной области. Место постановки

референтных электродов предварительно растирали абразивным гелем “Унискраб”. Пространство под электродами заполнялось небольшим количеством электропроводящего геля “Унимакс”, сопротивление электродов не превышало 5 кОм. ЭЭГ регистрировалась в монтаже с усредненным ушным референтом, частота оцифровки ЭЭГ составляла 250 Гц. Параметры ФВЧ и ФНЧ составляли 0.53 и 30 Гц соответственно, дополнительно использовался режекторный фильтр – 45–55 Гц. Для регистрации и анализа ЭЭГ использовалась программа WinEEG, стимулы предъявлялись с помощью программы Psytask.

Во время исследования испытуемый сидел в удобном кресле, перед ним на расстоянии 0.5 м располагался экран ноутбука. Для оценки правильности выполнения тестов и расчета времени реакции по отдельному каналу регистрировались сигналы от правой и левой кнопок мыши.

Расчет, сравнение и оценка психологических показателей, поведенческих характеристик (количество ошибок, время реакции, стандартная ошибка времени реакции) и ПСС проводилась в off-line режиме.

### *Обработка данных ЭЭГ*

Коррекция артефактов движения глаз проводилась путем обнуления независимых компонент ЭЭГ, соответствующих вертикальным и горизонтальным движениям глаз согласно следующей процедуре: выбирался отрезок записи ЭЭГ, содержащий хорошо выраженные артефакты движений глаз, длительностью не менее 120 с и раскладывался на независимые компоненты с помощью алгоритма Infomax, как описано в [14].

Кроме того, из дальнейшего анализа исключались эпохи, содержащие высокоамплитудные артефакты. Считалось, что эпоха содержит артефакты, если в ней наблюдались: (1) потенциалы с амплитудой более 100 мкВ для всех отведений; (2) медленные волны в диапазоне от 0.53 до 1 Гц с амплитудой более 50 мкВ; (3) быстрые колебания сигнала в диапазоне от 20 до 35 Гц с амплитудой более 35 мкВ. Эти пороговые значения были подобраны эмпирически в результате многократного выполнения обработки с различными параметрами и последующего визуального анализа результатов [13, 14].

Также из анализа исключались пробы с ошибочными ответами, то есть пробы Go, после предъявления которых в интервале 100–1000 мс испытуемый не нажал на кнопку, и все остальные пробы, если в том же интервале было совершено нажатие. Количество ошибочных проб подсчитывалось и сравнивалось между первым и последним тестами.

Расчет ПСС производился отдельно для каждого типа проб, каждого испытуемого и каждого теста. Затем данные каждого испытуемого усреднялись для получения индивидуальных ПСС, которые далее сравнивались между Тестами 1 и 6. Анализ данных ПСС проводился в следующих временных интервалах:

- 1) 0–1100 мс после начала предъявления изображения животного в качестве предупреждающего стимула;
- 2) 0–600 мс после начала предъявления второго изображения животного в пробе Go (пара картинок животное–животное);
- 3) 0–600 мс после начала предъявления изображения растения в пробе NoGo (пара картинок животное–растение).

### *Статистический анализ*

Поведенческие показатели – количество ошибок (пропусков и ложных нажатий), время реакции и его стандартная ошибка – сравнивались между 1-м и 6-м Тестами с помощью двустороннего критерия Вилкоксона. Поправка на множествен-

ность сравнений проводилась путем умножения значения  $p$  на количество сравниваемых параметров.

Для сравнительного анализа ПСС использовался основанный на кластерах анализ с перестановками [28], реализованный в программе WinEEG на основе инструментария FieldTrip MATLAB для анализа МЭГ/ЭЭГ (свободно доступного по адресу <http://fieldtrip.fcdonders.nl/>). В рамках этого метода на первом этапе выполнялось сравнение амплитуды волн потенциалов, связанных с событиями, зарегистрированных при выполнении Тестов 1 и 6, попарно для каждого условия теста, при этом для каждого канала и каждого временного отсчета в отдельности вычислялись значения статистик, полученных с помощью непараметрического критерия Вилкоксона. Затем различия со значениями  $p$  меньше критического ( $p < 0.01$ ) группировались в кластеры на основе временной и пространственной близости. Наконец, для каждого из выделенных кластеров с помощью метода Монте-Карло вычислялись суммы величин указанных статистик. Затем исходные данные случайным образом перемешивались и снова выполнялся поиск кластеров уже для перемешанных данных. Перемешивание выполнялось путем перестановок меток проб, число перемешиваний – 10000. Далее для каждого кластера, наблюдаемого в исходных данных, вычислялась вероятность выделения кластеров в перемешанных данных с большей или равной суммой статистик. Эта вероятность принималась в качестве статистической значимости кластера.

Такой метод имеет ряд преимуществ по сравнению с другими используемыми подходами [28]. Он исключает необходимость субъективного выделения интервалов времени, в которых наблюдаются различия сигналов, позволяет решить проблему множественных сравнений, так как осуществляет их кластеризацию на основании временного и пространственного подобия, и наконец, выполняет статистические оценки, используя непараметрические критерии.

Поправка на множественность сравнений проводилась путем умножения значения  $p$  на количество выделенных кластеров, рассматривались кластеры со статистической значимостью  $p < 0.05$  после применения поправки.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### *Психологические показатели*

При обработке данных психологического тестирования для каждого испытуемого подсчитывались показатели, полученные до и после проведения нейрофизиологического исследования по всем методикам, кроме УПМС. По данным корректурной пробы не выявлено ухудшения ее выполнения у большинства испытуемых после нейрофизиологического исследования – то есть, различий по количеству пропусков и ошибок и показателю концентрации внимания не отмечено. Психологические показатели по опроснику САН до начала проведения нейрофизиологического обследования находились в пределах нормальных значений у большинства испытуемых. Так, в опроснике САН по показателю “самочувствие” значения ниже нормы были выявлены у 4 испытуемых, по показателю “активность” – у 9 испытуемых, а по показателю “настроение” – у 5 испытуемых. По опроснику АС до начала проведения нейрофизиологического исследования у испытуемых наблюдался значительный разброс. Так, по шкале “Ак” средние значения (от 45 до 55 Т-баллов) наблюдались у 13 человек из группы, по шкале “То” – у 9 человек, по шкале “Са” – у 9 человек, по шкале “Сп” – у 4 человек, по шкале “Во” – у 9 человек. После проведения нейрофизиологического исследования у большей части испытуемых были выявлены различия, характеризующие ухудшение индивидуальных показателей по опросникам САН и АС и показателю чувства субъективной усталости. Далее для выявления статистической значимости отмеченных различий использо-



**Таблица 1.** Средние значения поведенческих показателей при выполнении Тестов 1 и 6

Тест	Пропуски	Ложные нажатия	Время реакции, мс	Стандартная ошибка времени реакции, мс
Тест 1	7.6	0.5	288	7.1*
Тест 6	12.3	1.4	297	9.3*

Звездочками отмечены значимые различия ( $p < 0.05$ ) показателей между тестами.

вался двусторонний Т-критерий Вилкоксона. Статистически значимые различия ( $p < 0.05$ ) были получены по следующим показателям:

- 1) показатели самочувствия, активности и настроения (по методике САН);
- 2) показатели по шкалам “активация—деактивация”, “самочувствие физическое — комфортное—дискомфортное”, “тонус — высокий — низкий” (по методике АС);
- 3) показатель субъективного чувства усталости.

По данным методики УПМС после проведения нейрофизиологического обследования у большинства испытуемых наблюдалась выраженность усталости (у 23 испытуемых), пресыщения (у 25 испытуемых) и монотонии (у 19 испытуемых), доходящая до высоких значений выраженности усталости (у 6 испытуемых), пресыщения (у 16 испытуемых) и монотонии (у 5 испытуемых).

#### *Поведенческие показатели*

Средние значения количества ошибок пропуска и ложных нажатий, а также среднее время реакции на Go стимулы в тестах 1 и 6 представлены в табл. 1. Было выявлено увеличение разброса (стандартной ошибки) времени реакции при ответе на пару “животное—животное” ( $T = 57.5, p < 0.05$ ).

#### *Потенциалы, связанные с событиями*

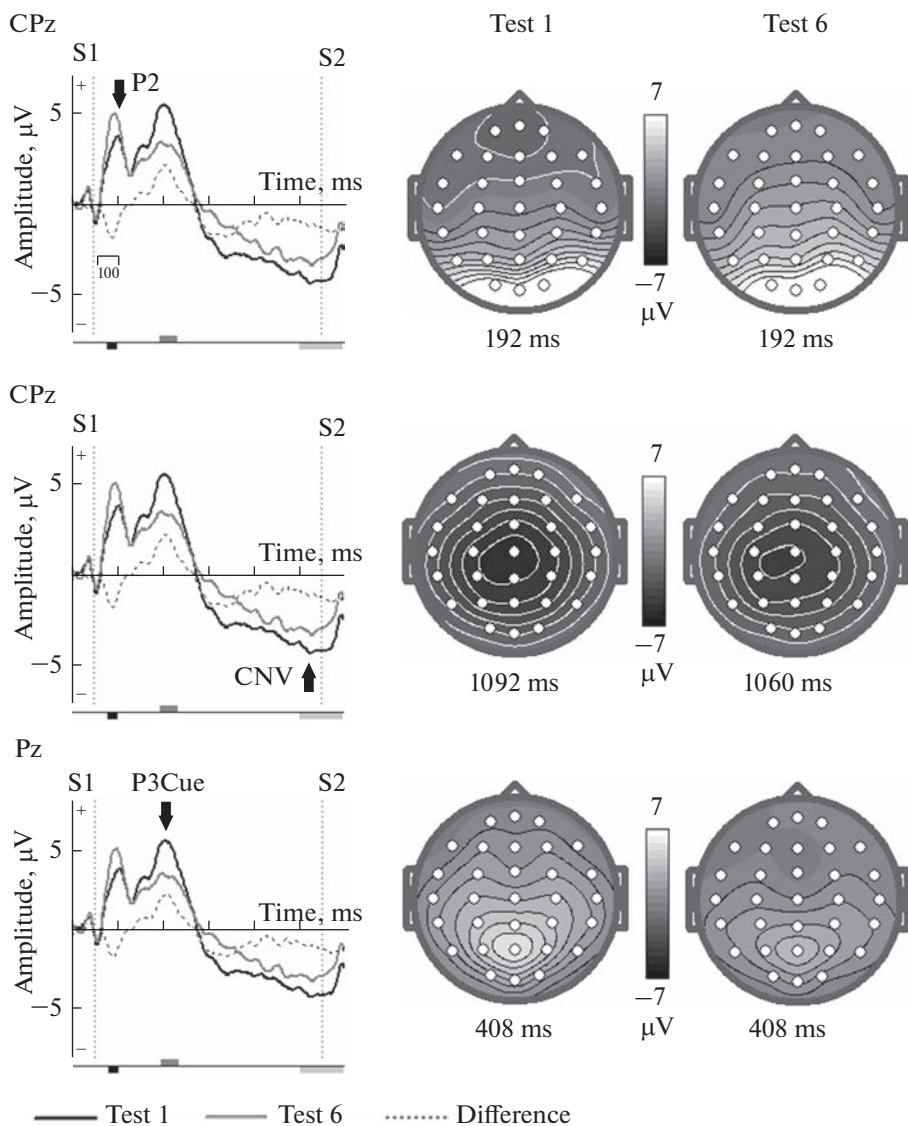
Основанный на кластерах анализ волн ПСС, зарегистрированных после предъявления изображения животного в качестве предупреждающего стимула (первый стимул в пробах Go и NoGo), выявил три кластера, соответствующие волнам P2, P3 Cue и волне условного негативного отклонения.

Первый кластер наблюдался в интервале 152—232 мс после начала предъявления предупреждающего стимула в отведениях  $F_3, F_z, F_4, F_8, FT_7, FC_3, FCZ, FC_4, FT_8, T_3, C_3, Cz, C_4, T_4, P_3, P_z, P_4$ . Амплитуда позитивной волны с максимумом топографии в теменно-затылочной области была увеличена ( $p < 0.01$ ) в Тесте 6 (рис. 2, верхний ряд).

Второй кластер наблюдался в интервале 388—592 мс после начала предъявления предупреждающего стимула в отведениях  $F_z, F_4, F_8, FT_8, T_3, Cz, C_4, T_4, CP_3, Cz, CP_4, P_3, P_z, P_4$ . Амплитуда волны положительной полярности с максимумом топографии в теменной области была уменьшена ( $p < 0.01$ ) в Тесте 6 (рис. 2, нижний ряд).

Третий кластер наблюдался в интервале 1016—1196 мс после начала предъявления предупреждающего стимула в отведениях  $Cz, C_4, FC_4, T_4, TP_8, TP_7, P_3, P_z, P_4, T_6, O_1, Oz, O_2$ . Амплитуда негативной волны с максимумом топографии в центральной области также была уменьшена ( $p < 0.001$ ) в Тесте 6 (рис. 2, средний ряд).

Сравнительный анализ волн ПСС, зарегистрированных после предъявления второго стимула, выявил кластер, наблюдаемый в условии NoGo в интервале 320—440 мс в отведениях  $F_3, F_z, F_4, FC_3, FCz, FC_4, FT_8, C_3, Cz, C_4, T_4, TP_7, CP_3, CPz, CP_4, TP_8, T_5, P_3, P_z, P_4, T_6$  и соответствующий волне P3 NoGo. Волна имела максимум топографии в лобно-центральных отведениях, и ее амплитуда была уменьшена ( $p < 0.001$ ) в Тесте 6 (рис. 3).

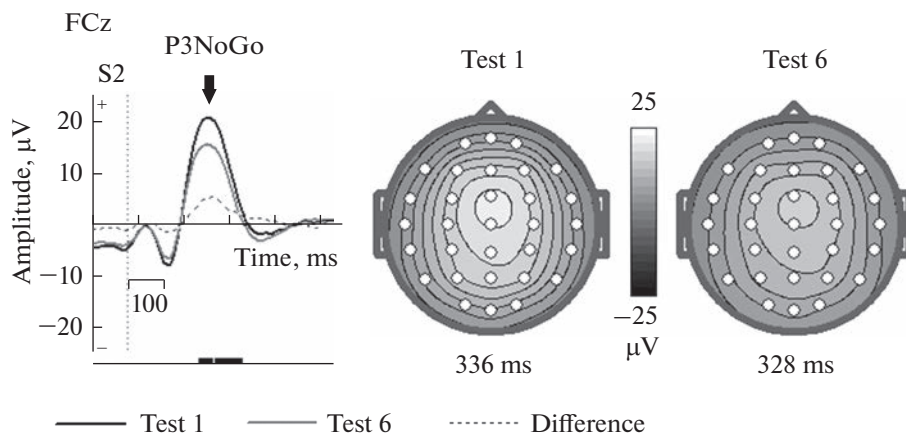


**Рис. 2.** Усредненные по группе испытуемых потенциалы, связанных с событиями, после предъявления предупреждающего стимула в Тестах 1 и 6, и топографии волн, различающихся между тестами. По оси  $X$  – время в мс, по оси  $Y$  – амплитуда в мкВ, вертикальная пунктирная линия – начало и конец предъявления стимулов (S1 и S2). Линия черного цвета – Тест 1, серая линия – Тест 6, пунктирная линия – разница. Гистограмма под графиком – кластеры, выделенные в результате статистического анализа.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

### *Психологические данные*

По результатам психологического тестирования в целом по группе после проведения нейрофизиологического обследования можно говорить об ухудшении самочувствия и настроения, а также о снижении уровня активности испытуемых (по опроснику САН). Это подтверждается данными, полученными по опроснику АС:



**Рис. 3.** Усредненные по группе испытуемых потенциалы, связанных с событиями, после предъявления NoGo стимула в Тестах 1 и 6, и топографии волны, различающейся между тестами. По оси  $X$  – время в мс, по оси  $Y$  – амплитуда в мкВ, вертикальная пунктирная линия – конец предъявления NoGo стимула. Линия черного цвета – Тест 1, серая линия – Тест 6, пунктирная линия – разница. Гистограмма под графиком – кластер, выделенный в результате статистического анализа.

наблюдается снижение оценок по шкале “Ак-АС”: “активация–деактивация”, что говорит об отсутствии мотивации к деятельности, безынициативному отношению к текущей ситуации; снижение оценок по шкале “То”: “тонус: высокий–низкий” свидетельствует о сниженной работоспособности, наличии утомления, инертности, заторможенности, ощущения вялости; и по шкале “Са”: “самочувствие физическое: комфортное–дискомфортное” – говорит о наличии неудовлетворительного физического самочувствия, ощущении телесного дискомфорта. Также по данным опросника УПМС можно говорить о наличии выраженной степени утомления, выражающейся в ухудшении показателей деятельности, психического пресыщения, потере интереса к выполняемой работе и неосознанному стремлению к варьированию способов исполнения, и собственно, монотонии, выражающейся снижением тонуса и восприимчивости, ослаблением сознательного контроля, ухудшением внимания и памяти, стереотипизацией действий, появлением ощущения скуки и потерей интереса к работе.

Таким образом, по данным психологического тестирования, после проведения нейрофизиологического исследования у группы испытуемых в целом ухудшается ряд вышеописанных показателей, что свидетельствует в пользу наличия сформированного состояния монотонии и утомления.

#### *Поведенческие показатели*

В результате проведенного исследования было выявлено увеличение стандартной ошибки времени реакции при нажатии на пару изображений “животное–животное” в последнем тесте по сравнению с первым ( $p < 0.05$ ). Вариабельность времени реакции по литературным данным является показателем способности к поддержанию внимания в процессе выполнения задачи [29], и его увеличение в Тесте 6 по сравнению с Тестом 1 согласуется с определением монотонии как функционального состояния человека, характеризующегося ослаблением сознательного контроля, ухудшением внимания и памяти, стереотипизацией действий и потерей интереса к работе.

*Волны ПСС*

Сравнительный анализ выявил статистически значимое снижение в Тесте 6 по сравнению с Тестом 1 амплитуды волн ПСС, регистрируемых после предъявления предупреждающего и NoGo стимулов. После предъявления предупреждающего стимула в Тесте 6 наблюдалось повышение волны P2 (рис. 2, верхний ряд), а также снижение волны P3 Cue (рис. 2, нижний ряд) и волны УНО (рис. 2, средний ряд). После предъявления императивного стимула различия наблюдались только по амплитуде волны P3 NoGo, которая также снижалась от первого теста к последнему (рис. 3).

Волна P3 Cue представляет собой положительное отклонение потенциала, начинающееся примерно через 300 мс после предъявления предупреждающего стимула и имеющую максимум на центрально-теменных электродах. Эта волна считается коррелятом процесса извлечения значимой информации из предупреждающего стимула [14, 18], направления внимания на императивный стимул [30] и активации программы соответствующего моторного ответа [31, 32]. По литературным данным источники волны P3 Cue локализируются в верхне-теменной коре, области, которую связывают с теменно-затылочной системой внимания [30]. Амплитуда волны P3 Cue в тестах на внимание отрицательно коррелирует со временем реакции и увеличивается после сеансов нейробиоуправления и транскраниальной стимуляции постоянным током вместе с улучшением внимания здоровых испытуемых [33]. Более того, у детей с синдромом нарушения внимания наблюдается снижение амплитуды этой волны по сравнению со здоровыми [30, 31]. Можно предположить, что снижение амплитуды волны P3 Cue в процессе развития монотонии может являться следствием ослабления внимания к последующему действию.

За волной P3 Cue следует негативное отклонение потенциала, которое продолжается до предъявления императивного стимула и называется условным негативным отклонением [17]. Эта волна состоит из двух компонентов: более ранняя лобно-центральная волна (О-волна) связана с ориентацией внимания и ожиданием императивного стимула, тогда как более поздняя волна (Е-волна) имеет более центральное распределение [34], как в нашем случае, и связана с подготовкой моторного ответа [35], в том числе, с поддержанием связи стимул–реакция и активацией моторного представительства кисти руки [36]. Источники генерации О-волны были обнаружены в таламусе, передней поясной и островковой коре, тогда как Е-волна генерируется в поясной и дополнительной моторной областях коры [35].

В данной работе мы обнаружили снижение амплитуды поздней составляющей волны ожидания, которую связывают с процессами подготовки моторного ответа. Подобные различия при развитии монотонии были выявлены также в предыдущих исследованиях [22, 23]. Снижение амплитуды УНО связывают с ослаблением ожидания стимула, которое, в свою очередь, является следствием снижения мотивации к выполнению задачи с развитием монотонии или утомления [22]. Подобные особенности были описаны как у здоровых испытуемых с низкой тревожностью по сравнению с испытуемыми с высокой тревожностью [37], так и у пациентов с психическими расстройствами, сопровождающимися нарушениями внимания, по сравнению со здоровыми, например, у пациентов с шизофренией [38, 39]. Связь УНО с успешной подготовкой к выполнению задания и параметрами производительности подчеркивается данными, показывающими повышенную амплитуду УНО в группе испытуемых, у которых снижено количество ошибок в тесте на внимание, по сравнению с группой испытуемых, которые делали больше ошибок и у которых амплитуда УНО была снижена [40]. В ряде работ было показано, что амплитуда волны ожидания негативно коррелирует с временем реакции при выполнении задачи [22, 41]. В нашем случае уменьшение амплитуды УНО не сопровождалось ни увеличением количества ошибок, ни увеличением среднего времени ре-

акции. Возможно, что уменьшение амплитуды волны ожидания является более чувствительным показателем развития монотонии, чем поведенческие показатели выполнения теста.

Несмотря на изменения волн ПСС, которые указывают на ослабление проактивного когнитивного контроля, качество выполнения Теста 6 практически не отличалось от Теста 1. Возможно, поддержание эффективности работы осуществлялось за счет изменения стратегии выполнения Go/NoGo теста, например, за счет компенсаторного усиления внимания на относительно ранних этапах обработки зрительных стимулов, которое отражалось в увеличении амплитуды волны P2.

Зрительная волна P2 имеет максимум в затылочных отведениях на временном интервале от 150 до 250 мс после предъявления зрительного стимула. Ее функциональный смысл связывают с кодированием зрительной информации в рабочей памяти [42], а также нисходящими влияниями от более высоких структур, включающих задние лобно-теменные области, которые обеспечивают фильтрацию сенсорной информации для более быстрой и эффективной обработки входящих стимулов за счет усиления внимания к релевантным стимулам [43–45].

Аналогично данным [46] в нашем исследовании в состоянии монотонии амплитуда P2 не менялась в затылочных отведениях, но увеличивалась в центрально-теменных и лобных областях. Можно предположить, что увеличение амплитуды P2 отражает большую мобилизацию ресурсов мозга для поддержания внимания к предупреждающему стимулу и эффективного выполнения задачи в ситуации, когда из-за развития монотонии исходной стратегии оказывается недостаточно [46].

Единственным показателем реактивного когнитивного контроля, который значимо менялся в процессе развития монотонии, была волна P3 NoGo, ее амплитуда снижалась в Тесте 6 по сравнению с Тестом 1. Эта волна имеет центральное распределение и регистрируется через 300–400 мс после предъявления стимула NoGo. Результаты предыдущих исследований показывают, что волна P3 NoGo отражает процесс подавления подготовленного действия [47, 48], и/или оценку результата подавления действия, либо оценку самого процесса подавления действия [41, 49]. Можно предполагать, что снижение этой волны в состоянии монотонии, так же как снижение волн P3 Cue и УНО, является следствием ослабления внимания к подготовке планируемого действия.

Подобные результаты по влиянию утомления на амплитуду волн P300 получали при анализе данных, зарегистрированных при выполнении других когнитивных тестов [24, 25]. Однако в ряде других работ изменений амплитуды P300 после выполнения утомляющих заданий обнаружено не было, возможно, потому что испытуемые выполняли задания недостаточно долго [22] или потому что для выявления различий сравнивались две разных группы испытуемых, которые выполняли одинаковые по длительности тесты, различающиеся по когнитивной нагрузке [27].

Результаты, полученные в данной работе, позволяют рассматривать волны P2, P3 Cue, P3 NoGo и УНО как возможные кандидаты на роль нейромаркеров монотонии, что делает перспективным использование этих показателей в системах мониторинга состояния человека во время выполнения операторской работы.

Известные ограничения данного исследования – то, что не исследована экологическая валидность полученных результатов, т.е. их переносимость на другие группы (например, отличные по возрасту или с другим уровнем образования). Для определения диагностически значимых порогов изменений требуется расширение нормативной базы данных – в первую очередь – исследования других возрастных групп.

## СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Все процедуры, выполненные в исследовании с участием людей, соответствуют этическим стандартам национального комитета по исследовательской этике и Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующим изменениям или сопоставимым нормам этики. Перед исследованием испытуемые подписывали информированное согласие на участие в исследовании, а также заполняли краткую анкету с данными о состоянии здоровья.

## ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках соглашения № 075-15-2021-291 от 15.04.2022 г. о предоставлении гранта в форме субсидий из федерального бюджета на осуществление государственной поддержки создания и развития научного центра мирового уровня ““Павловский центр “Интегративная физиология – медицине, высокотехнологичному здравоохранению и технологиям стрессоустойчивости””.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

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

## ВКЛАД АВТОРОВ

Идея работы, планирование эксперимента, разработка тестового задания (авторы М.В.П., С.М.Г., Б.Ю.А., Ш.Ю.А., Б.А.А., К.Г.В. и Ю.Д.К.), сбор данных (М.В.П., С.М.Г., Б.Ю.А.), обработка данных (М.В.П., С.М.Г., Х.Ю.Г.), написание и редактирование манускрипта (М.В.П., С.М.Г., Б.Ю.А., Х.Ю.Г., Ш.Ю.А., Б.А.А., К.Г.В. и Ю.Д.К.).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Леонова АБ* (1984) Психодиагностика функциональных состояний человека. М. Изд-во Моск ун-та. [*Leonova AB* (1984) Psychodiagnostics of human functional states] М. Moscow Univer Press. (In Russ)].
2. *Hu X, Lodewijks G* (2020) Detecting fatigue in car drivers and aircraft pilots by using non-invasive measures: The value of differentiation of sleepiness and mental fatigue. *J Safety Res* 72: 173–187.  
<https://doi.org/10.1016/j.jsr.2019.12.015>
3. *May JF, Baldwin CL* (2009) Driver fatigue: The importance of identifying causal factors of fatigue when considering detection and countermeasure technologies. *Transport Res Part F: Traffic Psychol Behav* 12(3): 218–224.  
<https://doi.org/10.1016/j.trf.2008.11.005>
4. *Williamson A, Lombardi DA, Folkard S, Stutts J, Courtney TK, Connor JL* (2011) The link between fatigue and safety. *Accid Anal Prevent* 43: 498–515.  
<https://doi.org/10.1016/j.aap.2009.11.011>
5. *Zhang Y, Ma J, Zhang C, Chang R* (2021) Electrophysiological frequency domain analysis of driver passive fatigue under automated driving conditions. *Scient Rep* 11: 20348.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-021-99680-4>
6. *Wascher E, Heppner H, Kobald SO, Arnau S, Getzmann S, Möckel T* (2016a) Age-Sensitive Effects of Enduring Work with Alternating Cognitive and Physical Load. A Study Applying Mobile EEG in a Real Life Working Scenario. *Front Hum Neurosci* 9: 711.  
<https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00711>
7. *Wascher E, Getzmann S, Karthaus M* (2016b) Driver state examination—Treading new paths. *Accid Anal Prev* 91: 157–165.  
<https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.02.029>
8. *Tanaka M, Shigihara Y, Ishii A, Funakura M, Kanai E, Watanabe Y* (2012) Effect of mental fatigue on the central nervous system: An electroencephalography study. *Behav Brain Funct* 8(1): 48.  
<https://doi.org/10.1186/1744-9081-8-48>
9. *Ahn S, Nguyen T, Jang H, Kim JG, Jun SC* (2016). Exploring neurophysiological correlates of drivers' mental fatigue caused by sleep deprivation using simultaneous EEG, ECG, and fNIRS data. *Front Human Neurosci* 10: 219.  
<https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00219>

10. *Кирой ВН, Асланян ЕВ* (2005) Общие закономерности формирования состояния монотонии. *Журн высш нерв деят* 55 (6): 768–776. [*Kiroy VN, Aslanyan EV* (2005) General patterns of formation of the state of monotony. *J Higher Nerv Activ* 55 (6): 768–776. (In Russ)].
11. *Лебедева НН, Каримова ЕД* (2014) Нейрофизиологические проявления состояния монотонии у операторов с различной межполушарной асимметрией альфа-активности. *Журн высш нерв деят* 64(4): 428. [*Lebedeva NN, Karimova ED* (2014) Neurophysiological manifestations of the state of monotony in operators with different interhemispheric asymmetry of alpha activity. *J Higher Nerv Activ* 64 (4): 428. (In Russ)].
12. *Wang C, Li B, Yao Y* (2021) Proactive Control Mediates the Relationship Between Working Memory and Math Ability in Early Childhood. *Front Psychol* 12: 611429. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.611429>
13. *Kropotov JD, Pronina MV, Ponomarev VA, Poliakov YI, Plotnikova IV, Mueller A* (2019) Latent ERP components of cognitive dysfunctions in ADHD and schizophrenia. *Clin Neurophysiol* 130(4): 445–453. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2019.01.015>
14. *Kropotov J, Ponomarev V, Tereshchenko EP, Müller A, Jäncke L* (2016) Effect of Aging on ERP Components of Cognitive Control. *Front Aging Neurosci* 8: 69. <https://doi.org/10.3389/fnagi.2016.00069>
15. *Braver TS* (2012) The variable nature of cognitive control: a dual mechanisms framework. *Trends Cogn Sci* 16(2): 106–113. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2011.12.010>
16. *Näätänen R, Picton TW* (1986) N2 and automatic versus controlled processes. *Electroencephal Clin Neurophysiol Suppl* 38: 169–186.
17. *Walter WG, Cooper R, Aldridge VJ, McCallum WC, Winter AL* (1964) Contingent Negative Variation: an electric sign of sensori-motor association and expectancy in the human brain. *Nature (Lond)* 203: 380.
18. *Bekker EM, Kenemans JL, Verbaten MN* (2004) Electrophysiological correlates of attention, inhibition, sensitivity and bias in a continuous performance task. *Clin Neurophysiol* 115: 2001–2013.
19. *Verleger R* (2020) Effects of relevance and response frequency on P3b amplitudes: Review of findings and comparison of hypotheses about the process reflected by P3b. *Psychophysiology* 57(7): e13542. <https://doi.org/10.1111/psyp.13542>
20. *Barkley RA* (1997) Behavioral inhibition, sustained attention, and executive functions: constructing a unifying theory of ADHD. *Psychol Bull* 121(1): 65–94. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.121.1.65>
21. *van Veen V, Carter CS* (2002) The anterior cingulate as a conflict monitor: fMRI and ERP studies. *Physiol Behav* 77(4-5): 477–482. [https://doi.org/10.1016/s0031-9384\(02\)00930-7](https://doi.org/10.1016/s0031-9384(02)00930-7)
22. *Boksem MA, Meijman TF, Lorist MM* (2006) Mental fatigue, motivation and action monitoring. *Biol Psychol* 72(2): 123–132. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2005.08.007>
23. *Lorist MM* (2008) Impact of top-down control during mental fatigue. *Brain Res* 1232: 113–123. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2008.07.053>
24. *Käthner I, Wriessnegger SC, Müller-Putz GR, Kübler A, Halder S* (2014) Effects of mental workload and fatigue on the P300, alpha and theta band power during operation of an ERP (P300) brain-computer interface. *Biol Psychol* 102: 118–129. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2014.07.014>
25. *Jia H, Lin CJ, Wang EM* (2022) Effects of mental fatigue on risk preference and feedback processing in risk decision-making. *Sci Rep* 12: 10695. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14682-0>
26. *Сериков ВВ, Обознов АА, Колягин ВЯ, Закревская АА* (2018) Применение когнитивного вызванного потенциала Р-300 для оценки работы мозга машинистов. *Организ психол и психол труда* 3(2): 166–182. [*Serikov ВВ, Oboznov АА, Kolyagin VYA, Zakrevskaya АА* (2018) The use of cognitive evoked potential P-300 to assess the work of the brain of machinists. *Organizat Psychol and Psychol Work* 3(2): 166–182. (In Russ)].
27. *Takács E, Barkaszi I, Altbäcker A, Czizler I, Balázs L* (2019) Cognitive resilience after prolonged task performance: an ERP investigation. *Exp Brain Res* 237(2): 377–388. <https://doi.org/10.1007/s00221-018-5427-8>
28. *Maris E, Oostenveld R* (2007) Nonparametric statistical testing of EEG- and MEG-data. *J Neurosci Methods* 164(1): 177–190. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2007.03.024>

29. *Reteig LC, van den Brink RL, Prinssen S, Cohen MX, Slagter HA* (2019) Sustaining attention for a prolonged period of time increases temporal variability in cortical responses. *Cortex* 117: 16–32. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2019.02.016>
30. *Albrecht B, Brandeis D, Uebel-von Sandersleben H, Valko L, Heinrich H, Xu X, Drechsler R, Heise A, Kuntsi J, Müller UC, Asherson P, Steinhausen HC, Rothenberger A, Banaschewski T* (2014) Genetics of preparation and response control in ADHD: the role of DRD4 and DAT1. *J Child Psychol Psychiatry* 55(8): 914–923. <https://doi.org/10.1111/jcpp.12212>
31. *Grane VA, Brunner JF, Endestad T, Aasen IES, Kropotov J, Knight RT, Solbakk AK* (2016) ERP Correlates of Proactive and Reactive Cognitive Control in Treatment-Naïve Adult ADHD. *PLoS One* 11(7): e0159833. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0159833>
32. *Elke S, Wiebe SA* (2017) Proactive control in early and middle childhood: An ERP study. *Dev Cogn Neurosci* 26: 28–38. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2017.04.005>
33. *Rêgo GG, Gonçalves ÓF, Boggio PS* (2022) Attention neuroenhancement through tDCS or neurofeedback: a randomized, single-blind, controlled trial. *Sci Rep* 12(1): 17613. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-22245-6>
34. *Rohrbaugh JW, McCallum WC, Gaillard AW, Simons RF, Birbaumer N, Papakostopoulos D* (1986) ERPs associated with preparatory and movement-related processes. A review. *Electroencephal Clin Neurophysiol Suppl* 38: 189–229.
35. *Aydin M, Carpenelli AL, Lucia S, Di Russo F* (2022) The Dominance of Anticipatory Prefrontal Activity in Uncued Sensory-Motor Tasks. *Sensors (Basel)* 22(17): 6559. <https://doi.org/10.3390/s22176559>
36. *Kóbor A, Kardos Z, Horváth K, Janacsek K, Takács Á, Csépe V, Nemeth D* (2021) Implicit anticipation of probabilistic regularities: Larger CNV emerges for unpredictable events. *Neuropsychologia* 156: 107826. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2021.107826>
37. *Wu Y, Ma S, He X, Xiang S, Qi S* (2021) Trait anxiety modulates the temporal dynamics of Stroop task switching: An ERP study. *Biol Psychol* 163: 108144. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2021.108144>
38. *Osborne KJ, Kraus B, Lam PH, Vargas T, Mittal VA* (2020) Contingent Negative Variation Blunting and Psychomotor Dysfunction in Schizophrenia: A Systematic Review. *Schizophr Bull* 46(5): 1144–1154. <https://doi.org/10.1093/schbul/sbaa043>
39. *Catalano LT, Wynn JK, Green MF, Gold JM* (2022) Reduced neural activity when anticipating social versus nonsocial rewards in schizophrenia: Preliminary evidence from an ERP study. *Schizophr Res* 246: 7–16. <https://doi.org/10.1016/j.schres.2022.05.028>
40. *Hohnsbein J, Falkenstein M, Hoormann J* (1998) Performance differences in reaction tasks are reflected in event-related brain potentials (ERPs). *Ergonomics* 41(5): 622–633. <https://doi.org/10.1080/001401398186793>
41. *Aasen IE, Brunner JF* (2016) Modulation of ERP components by task instructions in a cued go/no-go task. *Psychophysiology* 53(2): 171–185. <https://doi.org/10.1111/psyp.12563>
42. *Finnigan S, O'Connell RG, Cummins TDR, Broughton M, Robertson IH* (2011) ERP measures indicate both attention and working memory encoding decrements in aging. *Psychophysiology* 48: 601–611. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2010.01128.x>
43. *Freunberger R, Klimesch W, Doppelmayr M, Höller Y* (2007) Visual P2 component is related to theta phase-locking. *Neurosci Lett* 426: 181–186. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2007.08.062>
44. *Cepeda-Freyre HA, Garcia-Aguilar G, Eguibar JR, Cortes C* (2020) Brain Processing of Complex Geometric Forms in a Visual Memory Task Increases P2 Amplitude. *Brain Sci* 10(2): 114. <https://doi.org/10.3390/brainsci10020114>
45. *Male AG, O'Shea RP* (2023) Attention is required for canonical brain signature of prediction error despite early encoding of the stimuli. *PLoS Biol* 21(6): e3001866. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3001866>
46. *Sun L, Guo Z, Yuan X, Wang X, Su C, Jiang J, Li X* (2022) An Investigation of the Effects of Brain Fatigue on the Sustained Attention of Intelligent Coal Mine VDT Operators. *Int J Environ Res Public Health* 19(17): 11034. <https://doi.org/10.3390/ijerph191711034>



47. Bokura H, Yamaguchi S, Kobayashi S (2001) Electrophysiological correlates for response inhibition in a Go/NoGo task. *Clin Neurophysiol* 112(12): 2224–2232.  
[https://doi.org/10.1016/s1388-2457\(01\)00691-5](https://doi.org/10.1016/s1388-2457(01)00691-5)
48. Wessel JR, Aron AR (2014) It's not too late: The onset of the frontocentral P3 indexes successful response inhibition in the stop-signal paradigm. *Psychophysiology* 52: 472–480.  
<https://doi.org/10.1111/psyp.12374>
49. Huster RJ, Enriquez-Geppert S, Lavalée CF, Falkenstein M, Herrmann CS (2013) Electroencephalography of response inhibition tasks: Functional networks and cognitive contributions. *Int J Psychophysiol* 87: 217–233.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2012.08.001>

### Event-Related Potentials in Cued Go/NoGo Task are Possible Neuromarkers of Monotony

M. V. Pronina<sup>a, \*</sup>, M. G. Starchenko<sup>a</sup>, Yu. A. Boytsova<sup>a</sup>, A. A. Bogdan<sup>a</sup>,  
Yu. G. Khomenko<sup>a</sup>, G. V. Kataeva<sup>a</sup>, Yu. A. Shichkina<sup>a</sup>, and Yu. D. Kropotov<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Saint-Petersburg Electrotechnical University “LETI”, St. Petersburg, Russia*

*\*e-mail: marina.v.pronina@gmail.com*

Monotony or mental fatigue occurs during performing low-content and monotonous work, including the work of the operator. It is accompanied by a decrease in the concentration of attention and the speed of its switching, as well as slowing in the processes of perception and motor reactions, which can lead to a loss of vigilance, self-control and the occurrence of drowsiness and, consequently, an increase in the risk of industrial injuries and accidents. In this regard, an urgent task is to develop methods for monitoring the human condition in the process of performing monotonous activities. We investigated the effect of monotony on event-related potentials (ERPs) in the visual cued Go/NoGo test. We analyzed 31-channel EEG data of 25 healthy subjects recorded before and after performing four tests with a total duration of around 1.5 hours, representing the same type of tasks with different instructions and simulating the conditions of monotonous work. After performing four tests, we observe an increase of P2 wave, decrease of the P3 Cue wave and the contingent negative variation (CNV) wave in the Cue condition, as well as the decrease of P300 wave in the NoGo condition. The results obtained in this work are assumed to reflect attenuation in proactive and reactive cognitive control during monotony and allow us to consider the P2, P3 Cue, CNV and P3 NoGo waves as possible candidates for the role of neuromarkers of monotony, which makes it promising to use these indicators in systems for monitoring the human condition during operating work.

**Keywords:** event-related potentials, Go/NoGo task, monotony, cognitive control, P2, P300, contingent negative variation (CNV)