

УДК 612.821.2, 612.821.8, 617.3

ИНТЕРФЕЙС МОЗГ-КОМПЬЮТЕР “НА ВОЛНЕ P300”: ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА НОМЕРА СТИМУЛОВ В ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ИХ ПРЕДЪЯВЛЕНИЯ

© 2012 г. И. П. Ганин, С. Л. Шишкин, А. Г. Кочетова, А. Я. Каплан

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Поступила в редакцию 25.07.2011 г.

Наиболее практичной разновидностью интерфейсов мозг-компьютер (ИМК) в настоящее время являются ИМК, работающие по принципу выделения волны P300 вызванных потенциалов на задуманный пользователем стимул-символ. Одной из возможностей увеличения быстродействия таких ИМК является уменьшение числа повторных предъявлений стимулов. При этом возрастает относительный вклад в точность распознавания задуманного стимула реакций на первый по порядку стимул. Известно, что связанные с событиями потенциалы, (ССП), при первых предъявлениях стимулов могут иметь свою специфику. В частности, амплитуда ответов на первые предъявления во многих случаях повышена, что делает их особенно удобными для распознавания в ИМК. Однако в рамках ИМК этот эффект не изучался.

В настоящей работе анализировались SSP, зарегистрированные у здоровых испытуемых при использовании десяти предъявлений стимулов в стандартной парадигме ИМК ($n = 14$), а также при использовании режимов с тремя ($n = 6$) и одним ($n = 6$) предъявлением в модифицированной парадигме с движущимися позициями стимулов. В обоих случаях для первых предъявлений целевого стимула, а также для режима с однократным предъявлением стимула была характерна более высокая амплитуда SSP. Обсуждается возможность использования отличий реакций на первые или однократные предъявления стимула в ИМК “на волне P300” от реакций на более поздние стимулы при их многократном предъявлении для оптимизации скоростных режимов ИМК на волне P300.

Ключевые слова: интерфейс мозг-компьютер; связанные с событиями потенциалы; волна P300; волна N1; первый стимул; однократное предъявление стимулов.

Интерфейс мозг-компьютер (ИМК или BCI от англ. *brain-computer interface*) – современная нейротехнология, способная обеспечить человеку коммуникацию с внешними электронными и электронно-механическими устройствами без использования мышц и периферических нервов, например, только на основе регистрации электрической активности головного мозга [1]. ИМК-технологии уже находят свои приложения в реабилитационной медицине (для инвалидов-колясочников и пациентов с тетраплегией) и в ближайшем будущем займут свою нишу в сфере управления протезами и ортезами конечностей, манипуляторами и робототехническими устройствами, а также в оздоровительной медицине в качестве тренажеров дефицитарных функций мозга.

Несмотря на то, что к настоящему времени известно несколько типов ИМК [2, 3], наибольшее распространение получил предложенный еще в работе [4] так называемый ИМК “на волне P300”, использующий один из когнитивных компонентов связанных с событиями потенциалов (ССП) мозга [5]. В этом ИМК различные команды коди-

руются внешними стимулами, например, набором символов на экране монитора. ИМК-распознавание сделанного человеком выбора одной из команд происходит на основе сравнения амплитуды волны P300 [4] в ответ на кратковременные подсветки каждого из этих символов. В последнее время было показано, что наряду с P300 в этом интерфейсе целесообразно использование также ряда других компонентов SSP, в частности, затягивающего негативного компонента N1 с латентностью около 200 мс [6–9]. Более высокая амплитуда этих компонентов SSP в ответ на один из стимулов указывает на то, что этот стимул является для пользователя целевым и именно на нем он остановил свой выбор. В качестве стимульных матриц могут выступать не только пульта управления, но и наборы символов для печати текстов, при этом ИМК-распознавание целевых стимулов позволяет пользователю набирать текст, не прикасаясь к клавиатуре [4, 10, 11].

С целью повышения точности ИМК-распознавания выбранной пользователем команды каждый из набора стимулов предъявляется многократно, чтобы при последующем усреднении

реакций на каждый из типов стимулов в отдельности получить менее вариабельные результаты. Однако эта процедура очевидным образом замедляет ИМК-распознавание команды. Увеличить скорость ИМК-распознавания команд можно посредством более частого предъявления повторных стимулов, но этот прием повышает скорость ИМК лишь до определенного предела. Например, в работе [12] оптимальным для большинства испытуемых оказалось повторение стимулов от 4 до 8 в секунду, а при увеличении частоты повторных стимулов до 16 в секунду большинство испытуемых уже не могло использовать интерфейс.

Перспективным резервом для увеличения скорости ИМК остается совершенствование алгоритмов распознавания ЭЭГ-реакций на целевые стимулы при небольшом числе их повторений, вплоть до одного стимула (*single-trial* – однопробный режим) [13]. При этом явно или неявно предполагается (например, в [13]), что реакции на все стимулы одинаковы. Однако есть основания ожидать, что у реакций на первый стимул может быть своя специфика, а их вклад в суммарный ССП может быть наиболее весомым. Действительно, первому целевому стимулу “по определению” не предшествуют другие целевые стимулы в той же серии стимуляции, а после предыдущей серии стимулов в стандартных протоколах работы ИМК обычно помещают сравнительно длинную паузу (обычно несколько секунд или даже десятков секунд). В подобных ситуациях, в частности, амплитуда волны P300 снижается в ряду последовательных предъявлений целевых стимулов (см. обзор [14]). Амплитуда некоторых других компонентов ССП, в частности, вертекс-потенциалов в ответ на звук, при определенных условиях, в том числе при коротких межстимульных интервалах, может снижаться многократно уже при втором предъявлении стимула [15]. На снижение амплитуды P300 при последовательных предъявлениях стимулов может влиять тип реакции, требуемой в ответ на стимул [16]. Пользователь ИМК-P300 в стандартной методике выполняет задачу, которая нередко используется и в психофизиологических исследованиях – мысленный счет стимулов. Однако в ИМК-P300 есть своя специфика. Прежде всего, следует отметить очень короткие и обычно фиксированные интервалы между стимулами. Большинство исследований влияния номера стимула и числа стимулов на ССП проводилось при значительно более длинных интервалах, однако известно, что длина межстимульного интервала может влиять на амплитуду ССП, причем весьма сложным образом (см., например, [17]). Кроме того, затылочный компонент N1, вносящий большой вклад в работу ИМК-P300 у пользователей, не утративших возможность управлять своим взглядом [7, 9], в целом мало изучен (см. обзор

[18]) и его зависимость от порядкового номера стимула не изучалась.

Существование зависимости эффекта от условий задачи и специфика ИМК свидетельствуют о том, что для ответа на вопрос, есть ли существенные различия между ССП при многократном и однократном предъявлении стимулов (или предъявлении небольшого числа стимулов) в контексте ИМК-P300, требуются экспериментальные исследования. Их результаты позволили бы сформировать оптимальный режим предъявления стимулов в ИМК.

Если реакции на однократные целевые стимулы и реакции на первые стимулы в случае нескольких целевых стимулов имеют свои особенности, их знание могло бы помочь оптимизировать алгоритмы классификации ответов мозга и обеспечить повышение точности классификации в наиболее скоростных режимах работы ИМК-P300.

Целью настоящей работы было выяснить, обладают ли спецификой реакции на первые целевые стимулы в рамках парадигмы ИМК-P300, и различаются ли ССП при предъявлении одного и нескольких целевых стимулов. Для ответа на эти вопросы были проанализированы результаты экспериментов, ранее проводившихся в рамках исследования влияния пространственных факторов на компоненты ССП в ИМК-P300 [19], и исследования ССП в однопробном и трехпробном режимах стимуляции при многосессионной работе с модификацией ИМК-P300, в которой стимулы предъявлялись на движущихся объектах [20]. Последний режим ИМК становится особенно актуальным в связи с ожидаемой разработкой ИМК технологий для применения в сфере управления протезами конечностей, манипуляторами и подвижными роботами [21].

МЕТОДИКА

Во всех сериях экспериментальных исследований участвовали здоровые испытуемые, которые перед экспериментом познакомились с условиями его проведения и подписывали информированное согласие. Регламент экспериментов был одобрен Комиссией по биоэтике МГУ. Статистический анализ амплитуд компонентов ССП проводился в пакете STATISTICA 7.0 (StatSoft) с помощью парного и непарного *t*-критерия Стьюдента, дисперсионного анализа, при наличии более двух уровней факторов с повторными измерениями – многомерного дисперсионного анализа.

Эксперимент 1. Записи с многократным предъявлением стимулов. В экспериментах участвовали 14 испытуемых (6 мужчин и 8 женщин) в возрасте от 21 до 22 лет. На расстоянии 80 см от глаз испы-

туемого располагался монитор, на котором предъявлялись стимулы. На экране предъявлялась таблица размером 6×6 с буквами и символами русского алфавита (угловые размеры: таблица — $11.8^\circ \times 11.8^\circ$, ячейка — $0.7^\circ \times 0.8^\circ$). Стимулом служило выделение буквы (в форме потемнения — изменения цвета с серого на черный, см. [18, 22]) на 125 мс, причем одновременно (в соответствии со стандартным протоколом [4]) изменялась яркость символов в целом столбце или строке. Между стимулами были паузы длительностью по 63 мс. Потемнения шести строк и шести столбцов в случайном порядке — всего 12 разных стимулов — составляли одну стимульную последовательность, в которой было два целевых потемнения (одна и та же буква в составе столбца и строки) и десять нецелевых.

Задание испытуемого заключалось в том, чтобы сосредоточить внимание на заданной (целевой) букве и мысленно (молча) считать число потемнений, включающих эту букву. Работа с одной буквой составляла один блок, в течение которого предъявлялось 5 стимульных последовательностей. Между последовательностями отсутствовали дополнительные паузы. Каждый испытуемый работал с 20 целевыми буквами. Таким образом, ему суммарно предъявлялось 200 целевых и 1000 нецелевых стимулов.

Для записи ЭЭГ использовалось семь отведений (Fz , Cz , Pz , PO_7 , PO_8 , O_1 , O_2). Вертикальная электроокулограмма (ЭОГ) регистрировалась с помощью электродов, устанавливаемых над и под левым глазом. После ЭЭГ оцифровывалась с частотой 512 Гц. Запись и управление ходом эксперимента были организованы с использованием системы ВС12000 [23]. Из усреднения исключались эпохи, содержащие артефакты (в среднем 4.3% от всех эпох; максимальное число исключенных эпох у одного испытуемого не более 20%). ЭЭГ подвергалась полосной фильтрации в полосе 0.5–20 Гц (фильтр Баттерворта с компенсацией сдвига фазы). В усредненных связанных с событиями потенциалах оценивали амплитуду пиков компонентов P300 (отведение Pz) и затылочного N1 (отведения PO_7 , PO_8 , O_1 , O_2), соответственно, как максимальное и минимальное значение сигнала в окне [250 500] мс и [120 270] мс.

Эксперимент 2. Записи с небольшим числом предъявлений стимулов. В предварительных экспериментах тестировался режим с однократным предъявлением стимулов, а также оценивалась стабильность ССП при модификации методики ИМК-P300, использовавшейся далее в основной серии. В экспериментах приняли участие 5 испытуемых (1 мужчина и 4 женщины) в возрасте 21–22 года. Ранее мы показали отсутствие влияния движения таблицы со стимулами на ССП в ИМК-P300 [24], однако для проверки стабильно-

сти ССП при движении позиций стимулов друг относительно друга требовалось отдельное исследование. В качестве объектов, на которых предъявлялись стимулы, использовались кружки диаметром 1.2° , помеченные цифрами от 1 до 3 или от 1 до 9, в зависимости от числа объектов. Все они свободно двигались в пределах поля размером $14 \times 14^\circ$ в центре экрана с постоянной скоростью $5^\circ/\text{с}$, изменяя направление движения при парном соударении и при достижении края стимульного поля, или были зафиксированы в таблице 3×3 (размером $4.3^\circ \times 4.3^\circ$) также в центре экрана. Стимулом служила “подсветка” одного объекта (не в составе столбцов и строк, как в предыдущей серии) на 117 мс, при этом его рамка и цифра внутри него изменяли цвет с темно-серого на светло-серый. Между стимулами были паузы длительностью по 83 мс. Программирование стимулов осуществлялось в среде Matlab на базе пакета Psychtoolbox, регистрация ЭЭГ — с помощью усилителя NVX52 и программы CONAN-NVX.

Принципиальных отличий ССП на целевые стимулы в режимах с движущимися позициями стимулов от ССП в обычной парадигме ИМК-P300 (как полученных в этих экспериментах, так и в первой серии, а также известных из литературы) не наблюдалось. ССП в ответ на нецелевые стимулы практически отсутствовали, в отличие от того, что обычно наблюдается в ИМК-P300, однако анализ таких ССП не входил в задачи настоящего исследования. В связи с этим дальнейший анализ проводился на основе записей, сделанных в модификации ИМК-P300 с движущимися позициями стимулов.

В основной серии с движущимися позициями стимулов 12 испытуемых (3 мужчин и 9 женщин) участвовали каждый в 4 сессиях, проводимых в разные дни (минимальный интервал — 2 дня). Все испытуемые случайным образом были поделены на две группы: одни всегда работали в режиме с однократным предъявлением стимулов (группа “1”), другие — с трехкратным (группа “3”).

Использовалась разработанная нами игровая модификация ИМК-P300 [20, 25]. В каждой сессии после настройки (обучения) классификатора на основе линейного дискриминанта Фишера [26] в режиме с предъявлением 8 стимульных последовательностей (общая длительность около 4 минут) начиналась основная часть, где испытуемому предлагалось собирать картинки из отдельных элементов. Каждая картинка состояла из 9 элементов, из которых вырезались круги диаметром 2.15° . Эти круги (“шары”) двигались со скоростью $5.4^\circ/\text{с}$ внутри игрового поля размером $14^\circ \times 14^\circ$, изменяя направление движения при соударениях. Стимулом служила подсветка шара на 125 мс — увеличение яркости картинки. Одна стимульная последовательность состояла из подспе-

ток одного целевого и восьми нецелевых шаров в случайном порядке без пауз между подсветками, причем один шар никогда не подсвечивался два раза подряд. Целевой шар указывался справа от основного поля. Для удобства нахождения целевого шара и слежения за ним на каждом шаре была буква русского алфавита. Работа с одним целевым шаром составляла один блок, в котором были либо одна (группа “1”), либо три (группа “3”) стимульных последовательности.

Как только испытуемый находил целевой шар внутри поля, он нажимал на кнопку мыши, и через 3 секунды начиналась стимуляция. Испытуемые должны были внимательно следить за целевым шаром и мысленно отметить единственную подсветку целевого шара (группа “1”), либо мысленно отсчитывать каждую из трех подсветок целевого шара (группа “3”). Если классификатор правильно определял целевой шар, общая картинка дополнялась соответствующим элементом (шар при этом оставался в поле) и происходил переход к следующей цели, в противном случае засчитывалась ошибка и целью оставался этот же шар. Испытуемые всегда должны были собирать картинку, заполняя ее элементами слева направо и сверху вниз. Одна игра предполагала работу с одной картинкой, которая продолжалась до помещения в картинку последовательно всех девяти ее элементов, либо после набора 10 ошибок. Каждый испытуемый в каждой сессии проводил 10 таких игр, причем картинки не повторялись для одного испытуемого в течение всех сессий.

ЭЭГ регистрировалась с оцифровкой 500 Гц в шести отведениях: Cz , Pz , PO_7 , PO_8 , O_1 , O_2 . В качестве референтного электрода использовался электрод на мочке правого уха. Одновременно записывался потенциал на мочке левого уха, и перед обработкой производился пересчет ЭЭГ относительно объединенного электрода на мочках ушей. ЭЭГ регистрировалась монополярно с помощью электрода, установленного над левым глазом. Из усреднения исключались эпохи, содержащие артефакты (средняя доля для всех испытуемых во всех сессиях – 1.6% для группы “1” и 2.0% для группы “3”). Фильтрация ЭЭГ проводилась аналогично первой серии. Амплитуды пиков компонентов $P300$ (отведение Pz) и $N1$ (усреднение в отведениях PO_7 , PO_8 , O_1 , O_2) определялись аналогично первой серии в окнах [250 500] мс и [120 250] мс.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксперимент 1. Записи с многократным предъявлением стимулов. На рис. 1 показаны значения амплитуды $N1$ и $P300$ в ответах на первые целевые стимулы, а также четвертые, седьмые и десятые целевые стимулы. Для $N1$ был проведен дисперсионный анализ с двумя факторами с повторны-

ми измерениями: “номер стимула” и “позиция электрода”. Эффекты обоих факторов оказались значимыми (соответственно ($\lambda(3, 11) = 0.37$, $p = 0.011$, и $\lambda(3, 11) = 0.09$, $p < 0.00001$), а взаимодействия отведения и позиции целевого стимула выявлено не было ($\lambda(9, 5) = 0.29$, $p = 0.40$). Разница в амплитуде между первыми и остальными анализируемыми позициями стимулов во всех заточенных отведениях составляла 2.5–3 мкВ. Согласно отдельно проведенному однофакторному дисперсионному анализу, амплитуда $P300$ не зависела от позиции целевых стимулов ($\lambda(3, 11) = 0.95$, $p = 0.9$).

Аналогичные результаты были получены при сравнении амплитуд $N1$ и $P300$ в ответах на 1-й целевой стимул и в усредненном ответе на все целевые стимулы. Разница в амплитуде в отведениях PO_7 , O_1 , O_2 , PO_8 составила, соответственно, 3.0, 2.5, 2.6 и 2.6 мкВ и была наибольшей в отведении PO_7 , где амплитуда $N1$ в ответ только на первые целевые стимулы составила 9.1 мкВ, а при стандартном усреднении всех целевых эпох – только 6.1 мкВ. Влияние факторов “первый стимул vs усреднение по всем стимулам” и “позиция электрода” на амплитуду $N1$ было значимым, их взаимодействие – незначимым (соответственно $F(1, 13) = 33.9$, $p = 0.00006$; $\lambda(3, 11) = 0.12$, $p = 0.00002$; $\lambda(3, 11) = 0.61$, $p = 0.13$). Амплитуда компонента $P300$ в Pz при усреднении реакций на первые целевые стимулы была выше амплитуды при усреднении ответов на все целевые стимулы лишь на 1.3 мкВ, причем это различие не достигло уровня значимости ($t(13) = 1.99$, $p = 0.07$).

Эксперимент 2. Записи с небольшим числом предъявлений стимулов. На рис. 2 представлены ССП при однократном и трехкратном предъявлении стимулов, а также амплитуды компонентов $N1$ и $P300$. При анализе амплитуды $P300$ пришлось исключить данные по одному испытуемому из каждой группы в связи с тем, что во всех сессиях у этих испытуемых вместо $P300$ наблюдалась положительная волна со значительно меньшей латентностью (порядка 200 мс), имевшая несколько иные топографические и функциональные особенности (такой феномен наблюдается в ИМК- $P300$ у части здоровых испытуемых и пациентов – см., например, [11]).

Амплитуда пика $P300$ в усредненных по всем сессиям ССП на целевые стимулы не различалась между режимом с трехкратным предъявлением стимулов (группа “3”, усреднение по трем целевым стимулам) и с однократным предъявлением (группа “1”) в отведении Cz (непарный критерий Стьюдента: $t(8) = 0.20$, $p = 0.8$), однако была выше на 2 мкВ в отведении Pz в группе “1” (непарный критерий Стьюдента: $t(8) = 2.55$, $p = 0.03$). Анализ ССП на первое, второе и третье предъявления целевого стимула в режиме с трехкратным предъяв-

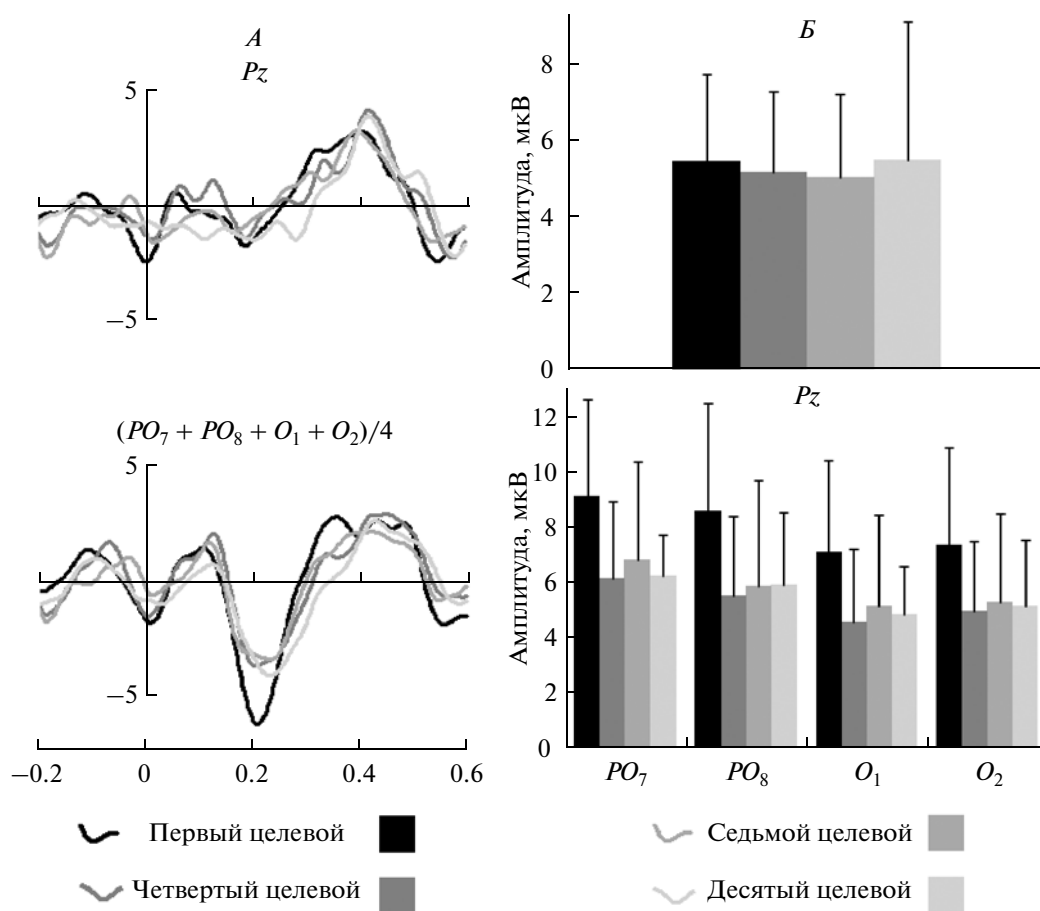


Рис. 1. Компоненты $N1$ и $P300$ в ответах на 1-й, 4-й, 7-й и 10-й целевые стимулы.

A – усредненные по группе ($n = 14$) ССП в отведениях Pz , где видна волна $P300$ (вверху) и в усреднении по затылочным отведениям (PO_7 , PO_8 , O_1 , O_2), где представлен компонент $N1$ (внизу). Для каждого испытуемого усреднялось 20 ответов каждого типа стимулов. Момент начала стимула соответствует 0 по оси времени (ось X , время в секундах). По оси Y дана амплитуда в мкВ. *Б* – амплитуда компонента $P300$ в Pz (вверху) и компонента $N1$ в отведениях PO_7 , O_1 , O_2 , PO_8 (внизу): среднее по группе ($n = 14$) и стандартное отклонение.

лением показал, что амплитуда $P300$ была выше для первого целевого стимула: амплитуда ответа на этот стимул превышала амплитуду ответов на второй и третий целевые стимулы приблизительно на 1 мкВ, и в Cz (парный критерий Стьюдента: $t(4) = 4.96$, $p = 0.008$, и $t(4) = 5.80$, $p = 0.004$, соответственно), и в Pz ($t(4) = 3.14$, $p = 0.03$, и $t(4) = 2.42$, $p = 0.07$, соответственно). Амплитуда $N1$ была выше в группе “1” в сравнении с группой “3”, но незначимо ($t(10) = 1.13$, $p = 0.28$), и не различалась между отдельно усредненными ответами на последовательные предъявления целевого стимула в группе “3” ($p > 0.5$).

Точность выбора испытуемым с помощью ИМК заданного шара составила с 1-ю по 4-ю сессию, соответственно, 52, 54, 49, 52% в среднем по группе “1” и 74, 74, 72, 76% по группе “3” (случайный уровень равнялся 11%, так как происходил выбор одного из девяти шаров). Согласно дисперсионному анализу, различия между группами бы-

ли значимыми ($F(1, 10) = 11.0$, $p = 0.008$), а влияние фактора сессии и его взаимодействие с фактором группы не были значимыми (соответственно ($\lambda(3, 8) = 0.81$, $p = 0.6$, и $\lambda(3, 8) = 0.92$, $p = 0.9$), поэтому для дальнейшего анализа данные были объединены по сессиям (рис. 3).

Точность классификации в оффлайн-режиме была рассчитана отдельно (по неусредненным данным) для каждого целевого стимула в режиме с трехкратным предъявлением стимулов (оффлайн-аналог точности выбора испытуемым целевого шара с помощью ИМК в режиме с однократным предъявлением, см. рис. 3, А). Точность при этом была равна 50, 48 и 47% соответственно для первого, второго и третьего предъявления стимула (различия не были значимыми: $p > 0.3$, парный критерий Стьюдента), не отличаясь значимо от точности при однократном предъявлении стимула ($p > 0.5$, непарный критерий Стьюдента).

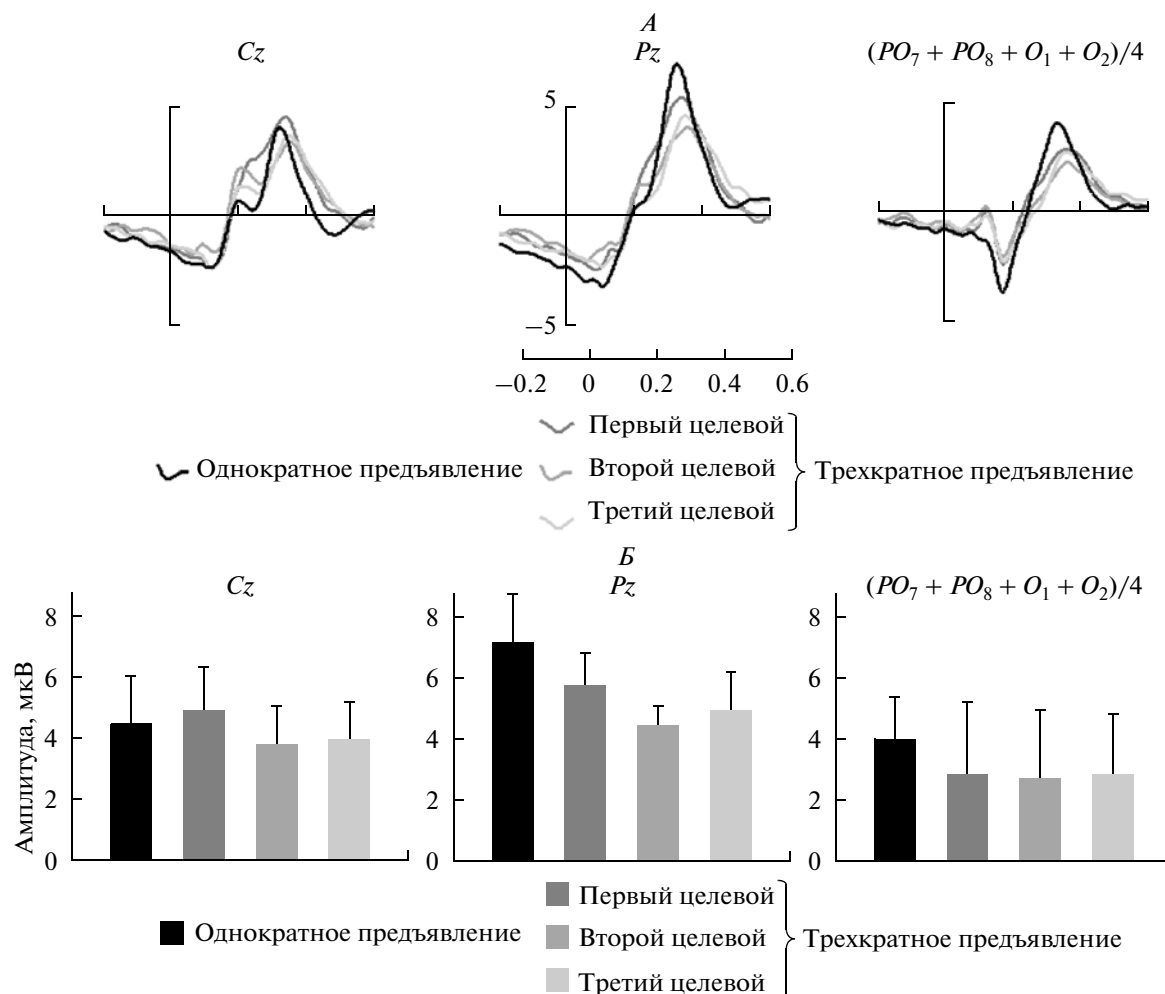


Рис. 2. Сравнение ССП в ответ на целевые стимулы при однократном предъявлении (группа “1”) и на каждый из трех целевых стимулов (группа “3”). А – ССП в отведениях Cz , Pz и в усредненном затылочном (момент начала стимула соответствует 0 мс по оси времени – ось X), Б – амплитуда пика $P300$ и (по модулю) $N1$ в тех же отведениях. Везде представлено усреднение по четырем сессиям. По оси Y – амплитуда в мкВ. Число испытуемых в каждой группе: $n = 6$ при анализе $N1$, $n = 5$ при анализе $P300$.

Отдельный интерес представляло влияние позиции целевого стимула среди нецелевых. Однако объем данных для каждой позиции даже при объединении данных по четырем сессиям был недостаточен для анализа ССП, поэтому мы ограничились анализом точности оффлайн-классификации. Точность для разных позиций целевого стимула в режиме с однократным предъявлением стимулов варьировала от 46 до 55%, в первой стимульной последовательности (при первом предъявлении каждого стимула) в режиме с трехкратным предъявлением – от 46 до 59% (рис. 3, Б). При объединении данных по позициям с 3-ю по 7-ю и их сравнении с первой и последней (9-й) позицией, эффект позиции был значимым ($\lambda(2, 9) = 0.45$, $p = 0.03$), однако при детальном анализе по всем позициям (9 уровней фактора позиции) он не достиг уровня значимости ($\lambda(8, 3) = 0.10$, $p = 0.17$). Парный t -тест, применявшийся

к парам из первой позиции и одной из остальных позиций, показал значимые различия ($p < 0.05$) для всех сравниваемых позиций, кроме четвертой и пятой, но только в режиме с трехкратным предъявлением стимулов.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В нашей работе были впервые проанализированы особенности связанных с событиями потенциалов мозга (ССП), в ответ на первые предъявления стимулов в парадигме ИМК “на волне $P300$ ”. Было обнаружено, что амплитуда компонента $N1$ с затылочной (преимущественно латерально-затылочной) локализацией и латентностью приблизительно 200 мс в ответ на первый целевой стимул в стандартном “табличном” варианте парадигмы ИМК- $P300$ была, приблизительно, в полтора раза выше, чем в ответ на более

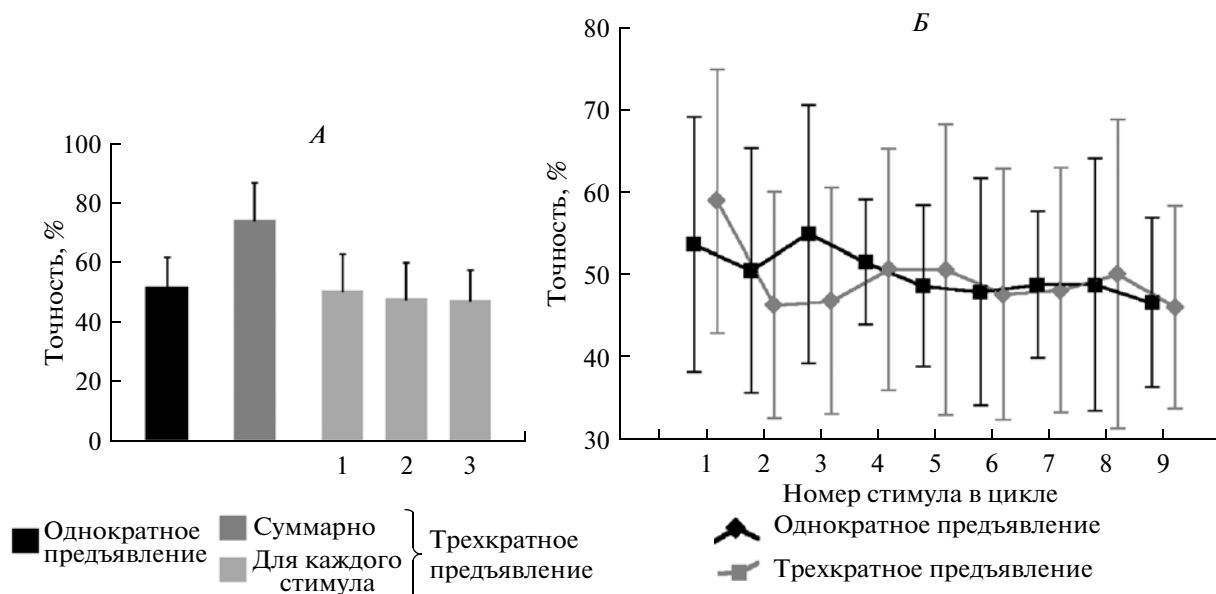


Рис. 3. Точность управления интерфейсом мозг-компьютер в эксперименте с небольшим числом предъявлений стимулов в зависимости от позиции целевого стимула. Точность рассчитывалась суммарно по всем четырем сессиям, как отношение числа успешных попыток выбора целевого шара к общему числу попыток. Показано среднее и стандартное отклонение.

А – точность при однократном предъявлении стимулов (группа “1”, $n = 6$), суммарно при трехкратном предъявлении стимулов (группа “3”, $n = 6$), а также при классификации отдельно по каждому из трех целевых стимулов (оффлайн-имитация режима с однократным предъявлением) в режиме с трехкратным предъявлением (группа “3”, $n = 6$).

Б – точность, рассчитанная отдельно для случаев, когда целевой стимул оказывался на различных позициях (с 1-й по 9-ю) среди нецелевых. При однократном предъявлении стимулов (группа “1”, $n = 6$) анализировались все данные, при трехкратном предъявлении стимулов (группа “3”, $n = 6$) – только первое предъявление каждого стимула.

поздние стимулы (рис. 1). Амплитуда волны $P300$ в отведении Pz , где она была наиболее выражена, в тех же условиях практически не снижалась.

При использовании небольшого числа предъявлений стимулов в авторской модификации ИМК- $P300$ с подвижными позициями стимулов нам не удалось найти значимых отличий амплитуды компонента $M1$ между первым, вторым и третьим предъявлениями стимулов, а также между режимом с однократным предъявлением стимулов и режимом с трехкратным предъявлением. Напротив, амплитуда волны $P300$ в ответ на первый стимул была значимо выше, чем в ответах на второй и третий стимул, а в отведении Pz она также была наиболее высокой в режиме с однократным предъявлением стимулов (рис. 2).

В целом, полученные нами данные согласуются с известными из литературы эффектами снижения амплитуды компонентов ССП при последовательных предъявлениях стимулов ([15]; обзор [14]). Однако они проявляются не во всех условиях (см., например, [27]) и их наличие и мощность не могли быть оценены конкретно для условий ИМК- $P300$ без соответствующих экспериментов. Тот факт, что амплитуда части компонентов ССП на первый стимул была выше в сравнении с реакциями на последующие стимулы не в разы, а

лишь на треть или в полтора раза, свидетельствует о том, что в исследованных вариантах ИМК- $P300$ эти эффекты могут не оказывать существенного воздействия на работу интерфейса. Это, казалось бы, подтверждается данными по точности работы классификатора, которая не выросла вместе с ростом амплитуды потенциалов. Однако надо иметь в виду, что обычно классификатор ИМК настраивается на распознавание ССП по амплитуде и, таким образом, не учитывает возможные их другие различия (по форме, топографии и др.), что, возможно, снижает его эффективность при малом числе стимулов.

При использовании небольшого числа усредняемых стимулов отдельного внимания может заслуживать возможная зависимость ССП от положения первого целевого стимула среди нецелевых, признаком которой была соответствующая зависимость точности классификации в наших данных (рис. 3, *Б*). Однако статистическая значимость эффекта была сравнительно невысокой ($p = 0.03$ без коррекции на множественные сравнения) и необходима его проверка в исследовании с участием большего числа испытуемых.

При предъявлении как 10, так и 3 целевых стимулов после последнего стимула в среднем наблюдалась несколько большая амплитуда $P300$

(рис. 1, 2), чем после стимулов в середине периода стимуляции. Этот эффект не был значимым, но обращает на себя внимание его соответствие описанному в психофизиологической литературе эффекту “ребаунда” в конце блока с фиксированным числом целевых стимулов, который, по-видимому, связан с повышенной субъективной значимостью последнего стимула [14]. Нельзя исключить, что при определенных условиях этот эффект может быть более выраженным, и в этом случае разработчикам ИМК-Р300 следует учитывать и его.

В режиме с предъявлением одного целевого стимула, где в каждом блоке требовалось реагировать только на однократное предъявление стимула, амплитуда Р300 была больше, чем для ССП на первый целевой стимул в режиме с трехкратным предъявлением. По-видимому, это объясняется тем, что хотя в обоих случаях испытуемый реагировал на первый целевой стимул, в одностимульной парадигме фокус внимания к первому и единственному стимулу был выше, чем в трехстимульной парадигме.

В целом, можно заключить, что полученные данные свидетельствуют о возможности повышения эффективности позиционных ИМК за счет модификации алгоритмов распознавания целевых ССП в направлении их дифференциального оценивания в ответах на первый и последующие целевые стимулы и, возможно, с учетом топографических особенностей ССП.

ВЫВОДЫ

1. В стандартной парадигме ИМК-Р300 при использовании 10 предъявлений целевого стимула амплитуда затылочного компонента N1 ССП в ответ на первый целевой стимул была выше, чем в ответ на более поздние целевые стимулы. Для компонента Р300 значимых эффектов снижения амплитуды в этих условиях не обнаружено.

2. В модифицированном варианте ИМК-Р300 с подвижными позициями стимулов и тремя предъявлениями целевого стимула амплитуда компонента Р300 была выше в ответ на первый целевой стимул, чем в ответ на второй и третий стимулы. Она также была выше при однократном предъявлении стимулов, чем при трехкратном предъявлении.

Работа частично поддержана ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009–2013 годы (госконтракт П1087) и ФСР МП НТС (программы “У.М.Н.И.К.”, проект 10228, тема 3, и “Старт”, госконтракт 7606р/10342).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Wolpaw J.R., Birbaumer N., McFarland D.J. et al.* Brain-computer interfaces for communication and control // *Clinical Neurophysiology*. 2002. V. 113. P. 767.
2. *Kaplan A.Ya., Lim J.J., Jin K.S. et al.* Unconscious operant conditioning in the paradigm of brain-computer interface based on color perception // *Int. J. Neurosci*. 2005. V. 115. P. 781.
3. *Brunner P., Bianchi L., Guger C. et al.* Current trends in hardware and software for brain-computer interfaces (BCIs) // *J. Neural Engineering*. 2011. V. 8. P. 025001.
4. *Farwell L.A., Donchin E.* Talking off the top of your head: toward a mental prosthesis utilizing event-related brain potentials // *EEG and Clin. Neurophysiol*. 1988. V. 70. P. 510.
5. *Mak J.N., Arbel Y., Minett J.W. et al.* Optimizing the P300-based brain-computer interface: current status, limitations and future directions // *J. Neural Engineering*. 2011. V. 8. P. 025003.
6. *Krusienski D.J., Sellers E.W., McFarland D.J. et al.* Toward enhanced P300 speller performance // *J. Neurosci. Methods*. 2008. V. 167. P. 15.
7. *Шушкин С.Л., Ганин И.П., Басюл И.А., Каплан А.Я.* Интерфейс мозг-компьютер на основе волны Р300: волна N1 и проблема дистракторов // *Матер. XV Междунар. конф. по нейрокибернетике*. 23–25 сентября 2009 г. Изд-во ЮФУ, 2009. Т. 2. Симпозиум “Интерфейс мозг-компьютер”. С. 30.
8. *Bianchi L., Sami S., Hikkerbrand A. et al.* Which physiological components are more suitable for visual ERP based brain-computer interface? A preliminary MEG/EEG study // *Brain Topography*. 2010. V. 23. P. 180.
9. *Treder M.S., Blankertz B.* (C)overt attention and visual speller design in an ERP-based brain-computer interface // *Behav. Brain Functions*. 2010. V. 6. P. 28.
10. *Коньшев В.А., Карловский Д.В., Михайлова Е.С. и др.* Исследование опознания задуманных букв и слов по волне Р300 вызванного потенциала мозга человека с помощью нейрокомпьютерного интерфейса // *Росс. физиол. журн. им. И.М. Сеченова*. 2007. Т. 93. С. 141.
11. *Sellers E.W., Vaughan T.M., Wolpaw J.R.* A brain-computer interface for long-term independent home use // *Amyotrophic Lateral Sclerosis*. 2010. V. 11. P. 449.
12. *McFarland D.J., Sarnacki W.A., Townsend G. et al.* The P300-based brain-computer interface (BCI): effects of stimulus rate // *Clinical Neurophysiology*. 2011. V. 122. P. 731.
13. *Blankertz B., Lemm S., Treder M. et al.* Single-trial analysis and classification of ERP components – a tutorial // *Neuroimage*. 2011. V. 56. P. 814.
14. *Murphy T.I., Segalowitz S.J.* Eliminating the P300 rebound in short oddball paradigms // *Int. J. Psychophysiol*. 2004. V. 53. P. 233.
15. *Fruhstorfer H., Soveri P., Järvillehto T.* Short-term habituation of the auditory evoked response in man // *EEG and Clin. Neurophysiol*. 1970. V. 28. P. 153.
16. *Lew G.S., Polich J.* P300, habituation, and response mode // *Physiology & Behavior*. 1993. V. 53. P. 111.

17. Wang A.L., Mouraux A., Liang M., Iannetti G.D. The enhancement of the N1 wave elicited by sensory stimuli presented at very short inter-stimulus intervals is a general feature across sensory systems // PLoS ONE. 2008. V. 3. P. e3929.
18. Shishkin S.L., Ganin I.P., Basyul I.A. et al. N1 wave in the P300 BCI is not sensitive to the physical characteristics of stimuli // J. Integrative Neuroscience. 2009. V. 8. P. 471.
19. Ганин И.П. Компонент N1 потенциалов коры мозга и пространственные факторы в интерфейсе мозг-компьютер “на волне P300” // Тез. докл. XIV науч. школы-конф. молодых ученых по физиологии высшей нервной деятельности и нейрофизиологии. М.: Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии, 2010. С. 37.
20. Ganin I.P., Shishkin S.L., Kaplan A.Y. A P300 BCI with stimuli presented on moving objects // Proceedings of the Fifth International BCI Conference 2011. 2011. P. 308.
21. McFarland D.J., Wolpaw J.R. Brain-computer interface operation of robotic and prosthetic devices // Computer. 2008. V. 41. P. 52.
22. Salvaris M., Sepulveda F. Visual modifications on the P300 speller BCI paradigm // J. Neural Engineering. 2009. V. 6. P. 046011.
23. Schalk G., McFarland D.J., Hinterberger T. et al. BCI2000: a general-purpose brain-computer interface (BCI) system // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. 2004. V. 51. P. 1034.
24. Shishkin S.L., Ganin I.P., Kaplan A.Y. Event-related potentials in a moving matrix modification of the P300 brain-computer interface paradigm // Neurosci. Lett. 2011. V. 496. P. 95.
25. Каплан А.Я., Шишкин С.Л. Заявка на патент РФ № 2011122085 от 01.06.2011.
26. Krusienski D.J., Sellers E.W., Cabestaing F. et al. A comparison of classification techniques for the P300 Speller // J. Neural Engineering. 2006. V. 3. P. 299.
27. Polich J. P300 development from auditory stimuli // Psychophysiology. 1986. V. 23. P. 590.

The P300 Based Brain-Computer Interface: Effect of Stimulus Position in a Stimulus Train

I. P. Ganin, S. L. Shishkin, A. G. Kochetova, A. Y. Kaplan

The P300 brain-computer interface (BCI) is currently the most efficient BCI. This interface is based on detection of the P300 wave of the brain potentials evoked when a symbol related to the intended input is highlighted. To increase operation speed of the P300 BCI, reduction of the number of stimuli repetitions is needed. This reduction leads to increase of the relative contribution to the input symbol detection from the reaction to the first target stimulus. It is known that the event-related potentials (ERP) to the first stimulus presentations can be different from the ERP to stimuli presented latter. In particular, the amplitude of responses to the first stimulus presentations is often increased, which is beneficial for their recognition by the BCI. However, this effect was not studied within the BCI framework.

The current study examined the ERP obtained from healthy participants ($n = 14$) in the standard P300 BCI paradigm using 10 trials, as well as in the modified P300 BCI with stimuli presented on moving objects in triple-trial ($n = 6$) and single-trial ($n = 6$) stimulation modes. Increased ERP amplitude was observed in response to the first target stimuli in both conditions, as well as in the single-trial mode comparing to triple-trial. We discuss the prospects of using the specific features of the ERP to first stimuli and the single-trial ERP for optimizing the high-speed modes in the P300 BCIs.

Keywords: brain-computer interface; BCI; event-related potentials; ERP; P300 wave; N1 wave; single-trial; first stimulus; stimulus position; stimulus train.