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

УДК 612.821.2, 612.821.8

**ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАФИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ
НА ЭМОЦИОНАЛЬНО ЗНАЧИМЫЕ СТИМУЛЫ В ТЕХНОЛОГИИ
ИНТЕРФЕЙСА МОЗГ-КОМПЬЮТЕР НА ВОЛНЕ P300**

© 2017 г. И. П. Ганин, Е. А. Косиченко, А. Я. Каплан

*Кафедра физиологии человека и животных биологического факультета,
МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
e-mail: ipganin@mail.ru*

Поступила в редакцию 01.03.2017 г.

Принята в печать 03.05.2017 г.

Интерфейс мозг-компьютер “на волне P300” (ИМК-P300) позволяет детектировать фокус внимания человека к определенному стимулу на экране компьютера по характеристическим признакам ЭЭГ, отличающим реакции на целевые и нецелевые стимулы. В обычной парадигме ИМК-P300 внимание испытуемого к тому или иному стимулу диктуется его явным практическим интересом к этому стимулу, инструкцией экспериментатора, или девиантностью этого стимула, определяемой его четким отличием от других стимулов.

В настоящей работе изучаются особенности восприятия предъявляемых в рамках одбол-парадигмы стимулов, которые обладают субъективной эмоциональной значимостью для испытуемого. Проверяется возможность использования ИМК-P300 для детектирования неявных фокусов внимания. Предположительно такая технология позволит оценивать способность человека к восприятию эмоциогенных стимулов, что может быть использовано для инструментальной диагностики акцентуированных состояний или нарушений эмоционального восприятия, например, при аутизме.

В исследовании на 14 испытуемых было показано, что точность распознавания эмоциогенных стимулов с помощью ИМК при пассивном предъявлении (в отсутствие задания дискриминации стимулов) статистически значимо превышала случайный уровень более, чем в два раза. Кроме того, были выявлены особенности компонентов потенциалов при предъявлении изображений различного содержания, а также в условиях низкого и повышенного уровня внимания к предъявляемым стимулам. Полученные результаты подтверждают гипотезу о том, что на основе парадигмы ИМК-P300 возможно детектирование неявных фокусов внимания человека к внешним стимулам, и дополняют уже имеющиеся сведения о механизмах мозга, ответственных за неосознаваемое восприятие субъективно значимых стимулов.

Ключевые слова: интерфейс мозг-компьютер (ИМК), электроэнцефалограмма (ЭЭГ), потенциалы, связанные с событиями (ПСС), зрительное внимание, волна P300.

DOI: 10.7868/S0044467717040074

ВВЕДЕНИЕ

Технология интерфейсов мозг-компьютер (ИМК) позволяет человеку научиться управлять внешними исполнительными устройствами на основе выделения командных признаков электроэнцефалограммы (ЭЭГ), без активации двигательных нервов и мышц [Wolpaw, 2007]. В настоящее время технология ИМК наиболее востребована в медицине, что связано с возможностью ее применения для управления робототехническими

устройствами – манипуляторами и инвалидными креслами [Alqasemi, Dubey, 2010; Lopes et al., 2011], в целях реабилитации – как дополнение комплекса процедур, направленных на восстановление утраченных двигательных функций после перенесенных травм и инсультов [Vidaurre et al., 2016], а также для предоставления таким пациентам возможности коммуникации, когда речевые и двигательные функции нарушены или утрачены [Nijboer et al., 2008]. Для управления в контуре

ИМК пользователю требуется совершать обусловленные инструкцией ментальные задачи, проявляющиеся в возникновении некоторых функциональных состояний, отголоски которых могут быть выделены из сигнала ЭЭГ и преобразованы в ассоциированные с этими состояниями команды.

В ИМК на основе волны Р300 (ИМК-Р300) выбор команд основан на анализе потенциалов, связанных с событиями, возникающих в ответ на предъявление пользователю набора внешних стимулов. Такой ИМК может представлять собой матрицу из букв и других символьных объектов, стимулами в которой являются подсветки отдельных ее элементов [Farwell, Donchin, 1988]. Для выбора желаемого символа пользователю необходимо обращать активное внимание на его подсветки, игнорируя в то же время подсветки всех остальных символов. При этом момент появления стимула, на котором сфокусировано внимание пользователя, сопровождается специфической реакцией—увеличением амплитуды волны Р300 и других компонентов потенциалов, связанных с событиями (ПСС). Сравнивая ПСС-ответы на различные стимулы, ИМК выделяет фокус интереса пользователя к такому значимому (целевому) символу и выполняет заранее ассоциированную с ним команду, например, на экране печатается соответствующая буква.

Важным условием для возникновения специфического ответа в ЭЭГ, определяющего успешность выбора команды в классической технологии ИМК-Р300, является заданная инструкцией значимость целевого стимула для пользователя, что и обуславливает активное избирательное внимание к этому стимулу. Однако известно, что волна Р300 в ЭЭГ-реакции может быть вызвана стимулами, привлекающими внимание человека неявным образом, т.е. без предварительной инструкции и явного практического интереса. Такое произвольное (автоматическое) внимание может иметь место в случае, если эти стимулы обладают для человека субъективной значимостью, обусловленной личным опытом, эмоциональным статусом или же биологической потребностью [Ohman et al., 2001]. Например, для респондентов с определенной зависимостью, было показано увеличение амплитуды компонентов ПСС в пассивных ответах на стимулы,

связанные с этой зависимостью: предъявление изображений с шоколадом [Asmaro et al., 2012] или наркотиками [Asmaro et al., 2014] лицам с сильным пристрастием к шоколаду или регулярно употребляющим марихуану, соответственно.

Таким образом, парадигма предъявления стимулов в ИМК-Р300 во многом подходит для исследований, где важными являются выявление особенностей ЭЭГ-реакций на определенные классы стимулов и предсказательной способности ЭЭГ в отношении отнесения того или иного стимула к определенному классу. Стимулы, имеющие биологическую значимость или эмоциональную окраску, вызывают реакцию, не требуя осознаваемой обработки [Ohman et al., 1988; Ohman et al., 2001]. Однако независимо от того, насколько осознанным является процесс восприятия таких стимулов, они в любом случае являются значимыми для субъекта, выделяясь тем самым среди других фоновых стимулов, и потому могут рассматриваться как значимые (или “целевые”) в контексте ИМК. Это открывает возможность инструментального детектирования целевых или эмоционально значимых стимулов по специфическим компонентам ЭЭГ-реакции.

Подбирая определенным образом стимульный материал для ИМК-Р300 и модифицируя некоторые детали этой методики, можно создать систему для распознавания уже не произвольных намерений-команд, а неявных фокусов внимания.

Такое произвольное смещение внимания к определенному стимулу может являться следствием психофизиологических особенностей индивида и его личного опыта, поэтому подобные системы могут использоваться как дополнительные средства инструментальной диагностики состояний, обусловленных психоэмоциональным статусом субъекта и, возможно, некоторыми нарушениями психики.

В частности, подобные системы могут применяться для автоматической детекции повышенного состояния возбуждения (эроузала) у людей ответственных профессий с высокими эмоциональными нагрузками [Singh et al., 2015]. Также известно, что эмоциогенные стимулы могут по-разному влиять на направленность внимания у субъектов с выраженным тревожным расстройством, вызывая отличия в ПСС по сравнению с нетревожными

испытуемыми [Wang et al., 2013]. Более того, нарушения в распознавании эмоций и памяти на лица показаны для субъектов с клинически высоким риском развития психоза [Скугаревская, Хоменко, 2013] и таких расстройств психики, как аутизм [Hobson et al., 1988]. Нарушение механизмов социально-эмоционального восприятия характерно не только для индивидов с аутистическим расстройством, но встречается и при субклинических проявлениях аутистических черт поведения, при которых так же, как и при аутизме, выявляются электрофизиологические особенности восприятия эмоциональных стимулов [Stavropoulos et al., 2016].

В этой связи целью настоящей работы было выявление особенностей ПСС в ответ предъявление человеку субъективно значимых стимулов в условиях отсутствия активного внимания к ним, обусловленного инструкцией, а также проверка гипотезы о возможности детектирования внимания испытуемого к субъективно значимым стимулам на основе технологии ИМК-Р300.

Для экспериментальной проверки гипотез в качестве предположительно значимых стимулов были выбраны две стандартизованные базы фотоизображений нейтрального и эмоционального содержания: одна состояла из фотографий различной тематики и сюжетов, другая включала только фотоизображения человеческих лиц. Оценка субъективной эмоциональной значимости предъявляемых стимулов для каждого испытуемого производилась на основе личных опросников.

МЕТОДИКА

В исследовании приняли участие 14 здоровых испытуемых в возрасте от 19 до 25 лет (медиана 21): 5 мужчин и 9 женщин. После ознакомления с информацией об исследовании все испытуемые подписывали информированное согласие. Проведение исследования было одобрено Комиссией по биоэтике МГУ имени М.В. Ломоносова.

Зрительные стимулы предъявлялись последовательно в режиме одбол-парадигмы по центру 24-дюймового жидкокристаллического монитора с угловыми размерами $36 \times 23^\circ$. В качестве стимульного материала использовались фотографии человеческих

лиц (Psychological Image Collection at Stirling—PICS [Hancock, 2008]) или фотографии различной тематики и сюжетов (International Affective Picture System—IAPS [Lang, 2008]). Стимулы размером $9.2 \times 13.8^\circ$ (лица) и $12.9 \times 9.6^\circ$ (изображения) предъявлялись на темно-сером фоне экрана. Длительность предъявления стимула составляла 200 мс, интервал между двумя соседними—500 мс, в течение которых экран оставался пустым. Запись ЭЭГ и предъявление стимулов осуществлялось в среде BCI2000 (www.bci2000.org) [Schalk, 2004]. Всего в исследовании было три блока, каждый из которых был разбит на 10 записей ЭЭГ с предъявлением стимулов:

(1) “Пассивное внимание. Лица”. Испытуемым давалась инструкция смотреть в центр экрана, где появлялись стимулы, так, чтобы четко их видеть. Испытуемым также говорилось, что потом им будет необходимо выполнить некоторое задание со стимулами, которые они увидят. Стимулами служили фотографии человеческих лиц из базы PICS.

(2) “Пассивное внимание. Изображения”. Инструкция была аналогичной, а в качестве стимулов использовались изображения из базы IAPS.

(3) “Активное внимание”. Одно из изображений в начале каждой записи указывалось как целевое, и испытуемые получали инструкцию мысленно четко считать моменты появления целевого стимула. В качестве стимулов использовались тот же набор изображений из базы IAPS, как и в блоке (2).

Стимулы для каждого блока были сгруппированы в наборы по шесть в одной записи. Порядок наборов стимулов во всех записях внутри каждого блока задавался случайным образом для всех испытуемых. Стимуляция осуществлялась в виде стимульных последовательностей, каждая из которых включала предъявление всех шести стимулов набора по одному разу в случайном порядке. Одна запись содержала 10 стимульных последовательностей, что соответствует предъявлению каждого из шести изображений по 10 раз в случайном порядке. Суммарно, таким образом, в каждом блоке предъявлялось по 600 стимулов. Порядок блоков чередовался случайным образом для всех испытуемых с тем условием, что блок (3) с активным вниманием всегда следовал последним.

Наборы стимулов формировались таким образом, чтобы в каждом наборе присутствовали разные по эмоциональной окраске изображения, основная часть которых являлась нейтральными, а одно-два могли нести для испытуемых различные (позитивные или негативные) эмоциональные оттенки. После завершения первых двух блоков перед началом последнего блока испытуемые оценивали все увиденные изображения по визуальной аналоговой шкале. Для этого изображения последовательно предъявлялись на экране на 1000 мс, после чего испытуемые должны были оценить изображение, поставив отметку на шкале длиной 100 мм с крайними значениями “Не вызвало эмоций” / “Вызвало эмоции”. Группа эмоциональных стимулов в каждом блоке формировалась на основе результатов субъективной оценки стимулов испытуемыми: изображение с наибольшим количеством баллов по указанной шкале считалось эмоциогенным, при этом учитывался минимальный порог, рассчитываемый для каждого испытуемого. В блоке (3) в качестве целевого стимула в каждой записи всегда указывалось наиболее нейтральное изображение, что также контролировалось после заполнения испытуемыми шкалы. Таким образом, в первых двух блоках можно было анализировать ПСС в ответ на эмоциогенные стимулы в условиях парадигмы пассивного внимания, а в третьем блоке — ПСС при повышенном уровне внимания на задаче, как на эмоциогенные стимулы вне фокуса внимания, так и на нейтральные целевые стимулы, к которым внимание было привлечено инструкцией.

ЭЭГ регистрировалась в 24 каналах: F3, Fz, F4, FC5, FC1, FC2, FC6, C3, Cz, C4, CP5, CP1, CP2, CP6, P7, P3, Pz, P4, P8, PO7, POz, PO8, O1, O2. Объединенные референтные электроды располагались на мастоидах. Для анализа ПСС после удаления глазодвигательных артефактов сигнал ЭЭГ подвергался полосной фильтрации в диапазоне 0.5–20 Гц (фильтр Баттерворта), затем отдельно усреднялись эпохи для эмоциогенных/целевых стимулов и нецелевых стимулов. Перед усреднением число эпох в двух классах выравнивалось: в каждой записи ЭЭГ из выборки случайным образом исключалась часть нецелевых эпох. Амплитуды компонентов рассчитывались в разностных ПСС (эмоциогенные/целевые минус нецелевые) как максимальное (P300, P200) или минимальное (N170) значение сигнала

в индивидуально подобранном окне (ввиду сильных вариаций в латентностях пиков). В среднем латентность компонента N170 составляла 160–200 мс, P200–200–300 мс, P300–300–400 мс. При трудностях в идентификации определенных компонентов соответствующие испытуемые исключались из анализа данного компонента. Компоненты анализировались в отведениях, где они имеют наибольшую выраженность: P300 и P200 — в Cz и Pz, а компонент N170 — в усреднении по отведениям PO7, PO8, O1, O2.

Для оценки эффективности классификации реакций на эмоциогенные или целевые стимулы использовался подход ИМК-Р300 с классификатором на основе линейного дискриминанта Фишера. Тестирование классификации осуществлялось с применением кросс-валидации, с анализом сигнала в наиболее типичных для ИМК-Р300 отведениях: Cz, P3, Pz, P4, PO7, PO8, O1, O2. Обучение классификатора осуществлялось на всей выборке по всем записям одного блока, кроме записи, на которой проводилось тестирование классификатора; на каждой итерации тестировалась следующая запись с повторным обучением классификатора на выборке, полученной после исключения данных тестируемой записи. Обучение осуществлялось по двум классам — целевые (эмоциогенные) стимулы и нецелевые (нейтральные) стимулы. При тестировании классификатора полученные на стадии обучения веса применялись к тестируемым признакам сигнала, и для каждого из шести уникальных стимулов в записи рассчитывалось так называемое значение “выхода” (output) классификатора. По аналогии с классическим подходом ИМК-Р300, “целевым” стимулом считается тот, для которого значение “выхода”, усредненное по 10 стимульным последовательностям записи, является максимальным. Если данный стимул являлся самым эмоциогенным (блок 1 и 2) или целевым согласно заданию (блок 3), то классификация считалась успешной. Анализ результатов осуществлялся в среде MATLAB R2013b (8.2) (MathWorks) с помощью специально написанных скриптов, а также в пакете STATISTICA 7.0 (StatSoft).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для сравнения реакций в ответ на предъявление эмоциогенных стимулов в условиях пассивного внимания и активного внимания

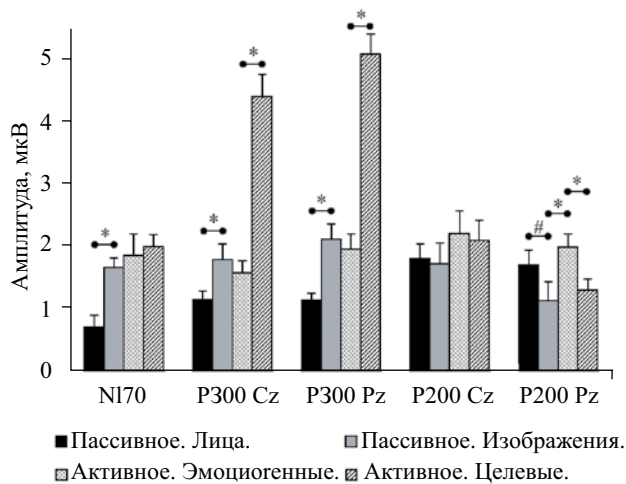


Рис. 1. Средняя амплитуда компонентов N170 ($n=13$), P200 ($n=13$) и P300 ($n=14$) в блоках с пассивным вниманием (эмоциональные стимулы) и в блоке с активным вниманием (эмоциональные и целевые нейтральные стимулы). Показаны среднее и стандартная ошибка среднего. * $-p<0.05$, # $-p<0.1$.

Fig. 1. Mean amplitudes of components N170 ($n=13$), P200 ($n=13$) and P300 ($n=14$) in blocks with passive attention (emotional stimuli) and in the block with active attention (emotional and target neutral stimuli). Mean and standard error of mean are shown. * $-p<0.05$, # $-p<0.1$.

(с инструкцией считать целевые нейтральные стимулы) в блоках (2) и (3) были проанализированы усредненные по группе амплитуды компонентов ПСС: P300, P200 и N170 (рис. 1). Амплитуды компонентов P300 (в Cz и Pz), P200 (в Cz), а также амплитуды компонента N170 в ответ на эмоциональные стимулы в ряду нейтральных стимулов не различались при отсутствии и наличии активного внимания к предъявляемым стимулам ($p>0.05$, парный критерий Стьюдента). Амплитуда компонента P200 (в Pz) в ответ на эмоциональные стимулы в задании с активным вниманием составила 1.99 ± 0.20 мкВ (среднее \pm стандартная ошибка среднего) и была выше, чем в задании с пассивным вниманием (1.13 ± 0.30 , $t(12)=-2.44$, $p<0.05$).

В блоке (3) с активным вниманием были проанализированы амплитуды компонентов ПСС в ответ на эмоциональные стимулы вне фокуса внимания и нейтральные стимулы, которые являлись для испытуемых целевыми согласно инструкции (рис. 1). Амплитуда компонента P300 в ответ на целевые стимулы в отведении Cz составила 4.39 ± 0.36 мкВ, в отведении

Pz— 5.08 ± 0.31 мкВ, и была выше, чем в ответ на эмоциональные стимулы (1.58 ± 0.19 мкВ, $t(13)=7.97$, $p<0.01$ и 1.95 ± 0.24 мкВ, $t(13)=10.45$, $p<0.01$, соответственно). Амплитуды компонентов P200 (в Cz) и N170 не различались между целевыми и эмоциональными стимулами ($p>0.05$). Однако амплитуда P200 в отведении Pz в ответ на эмоциональные стимулы составила 1.99 ± 0.20 мкВ и была выше, чем в ответ на целевые стимулы (1.30 ± 0.17 мкВ, $t(12)=-2.22$, $p<0.05$).

Для сравнения типа стимульного материала в блоках (1) и (2) с пассивным вниманием были проанализированы амплитуды компонентов ПСС в ответ на эмоциональные стимулы на основе фотографий человеческих лиц и на основе изображений (рис. 1). Амплитуда компонента N170 для стимулов-изображений составила -1.66 ± 0.15 мкВ и была выше, чем для стимулов-лиц (-0.70 ± 0.19 мкВ, $t(12)=3.98$, $p<0.01$). Амплитуда компонента P300 в отведениях Cz и Pz для стимулов-изображений составила 1.78 ± 0.25 и 2.11 ± 0.25 мкВ и также была выше, чем для стимулов-лиц (1.14 ± 0.14 мкВ, $t(13)=-3.30$, $p<0.01$ и 1.13 ± 0.11 мкВ, $t(13)=-4.82$, $p<0.01$, соответственно). Амплитуда компонента P200 в отведении Cz не отличалась между двумя типами стимулов ($p>0.05$), однако в Pz имела тенденция к различиям: амплитуда P200 для стимулов-лиц составила 1.70 ± 0.24 мкВ, а для стимулов-изображений— 1.13 ± 0.30 мкВ ($t(12)=2.04$, $p=0.06$).

На рис. 2 представлены результаты точности классификации целевых/эмоциональных стимулов в трех блоках. В блоках с пассивным вниманием средняя точность распознавания классификатором наиболее эмоционального стимула-изображения составила $45.7\pm 5.5\%$ и не отличалась значимо от блока со стимулами-лицами ($39.3\pm 6.2\%$, $Z=0.84$, $p>0.05$, парный критерий Вилкоксона). В блоках со стимулами-изображениями точность классификации целевых стимулов при активном внимании составила $81.4\pm 2.9\%$ и была выше, чем для эмоциональных стимулов при пассивном внимании ($Z=3.07$, $p<0.01$). При этом точность классификации для режимов с пассивным вниманием более чем вдвое превышала случайный уровень 16.7% (выбор одного из 6 стимулов), значимость данных различий подтверждается перестановочным тестом со случайным перемешиванием эпох при обучении

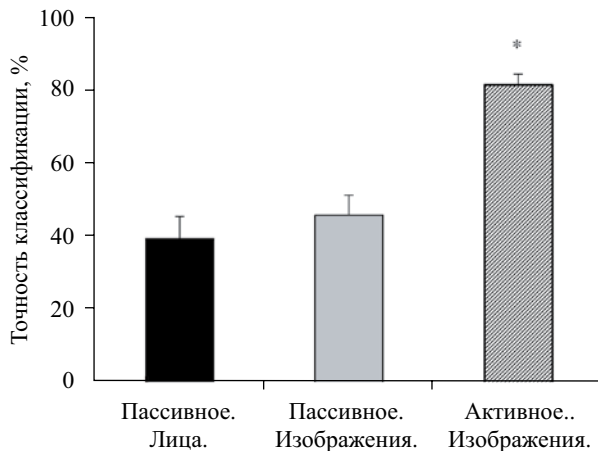


Рис. 2. Точность классификации эмоциогенных (в блоках с пассивным вниманием) и целевых (в блоке с активным вниманием) изображений для всех испытуемых ($n=14$). Показаны среднее и стандартная ошибка среднего. *—отличие от режима с пассивным вниманием ($p<0.05$).

Fig. 2. Classification accuracy of emotional images (blocks with passive attention) and target images (block with active attention) for all subjects ($n=14$). Mean and standard error of mean are shown. *—difference from the passive attention condition with $p<0.05$.

классификатора: $p<0.01$ для обоих режимов. Несмотря на невысокую среднюю точность, около трети испытуемых в блоках с пассивным вниманием достигали точности 60–80%. Также точность классификации стимулов на основе фотоизображений лиц прямо коррелировала с амплитудой компонента N170 в ответ на эти стимулы ($R=0.59$, $p<0.05$). В блоке с активным вниманием точность прямо коррелировала с амплитудой компонента P300 в ответ на целевые стимулы ($R=0.58$, $p<0.05$ для Cz и $R=0.68$, $p<0.05$ для Pz).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Целью данной работы было выявление особенностей ПСС в ответ на предъявление человеку эмоционально окрашенных стимулов в условиях отсутствия активного внимания к ним, а также выяснение того, могут ли и с какой степенью надежности реакции пассивного внимания к таким стимулам быть классифицированы в рамках существующих алгоритмов ИМК-Р300. Основным результатом стало то, что реакции ПСС в ответ на такие эмоциогенные стимулы обладают рядом особенностей и даже в отсутствие активного внимания

к таким стимулам, они могут быть выделены среди остальных стимулов с помощью ИМК с точностью, статистически значимо превышающей случайный уровень.

Обычно при выборе команд в ИМК-Р300 пользователь сознательно фокусирует внимание на целевом стимуле, подсчитывая согласно инструкции число его предъявлений и игнорируя нецелевые стимулы. Точность распознавания целевой команды при этом, как правило, стремится к 90% [Guger et al., 2009; Ганин, Каплан, 2014]. При моделировании такой парадигмы в настоящей работе средняя точность классификации одного из шести стимулов, который испытуемые сознательно подсчитывали, составила более 80%, что значительно превышало случайный уровень классификации (17.6%). В то же время средняя точность классификации наиболее эмоциогенного стимула из каждого предъявляемого набора в блоках с пассивным вниманием, когда у испытуемого не было инструкции подсчитывать какой-то конкретный стимул, составила не более 46%, т.е. около половины от точности в блоке с активным вниманием (рис. 2). Достаточно высокая точность классификации при активном внимании испытуемых к стимулу по ЭЭГ-реакции, показанная в нашей и в других работах, очевидно, определяется прямой зависимостью выраженности компонента P300 от заданной инструкцией значимости стимула в контексте операторской задачи [Picton, 1992].

В свою очередь хотя и значимые, но невысокие значения точности классификации эмоциогенных стимулов могут быть обусловлены низкими значениями амплитуды P300 и других компонентов ПСС в ответ на стимулы, предъявляемые без предварительных инструкций, т.е. вне контекста задачи на их распознавание. Это подтверждается наличием значимой корреляции между точностью детектирования эмоциогенных/целевых стимулов в ИМК и амплитудой P300 только в блоке с активным вниманием, в котором амплитуда P300 была более, чем вдвое выше для целевых стимулов, чем для эмоциогенных (рис. 1). По-видимому, чувствительность технологии с P300 сохраняется, даже если испытуемый осознанно не проявляет активного внимания к стимулу, если при этом сохраняется его девиантность в каком-то значимом для испытуемого отношении и этот стимул воспринимается на неосознанном

уровне [Polich, 1989; Bernat et al., 2001]. Известно, что эмоциогенные стимулы вызывают специфические ЭЭГ-ответы, обусловленные повышением уровня внимания к таким стимулам, что проявляется в повышении амплитуды или возникновении определенных компонентов ПСС [Schupp et al., 2003]. Показанное в настоящей работе более чем двукратное превышение случайного уровня при классификации эмоциогенных стимулов свидетельствует о возможности использования реакций ПСС в технологии ИМК-Р300 для детектирования субъективной значимости тестируемых стимулов, т.е. проявления к ним незаметного для самого испытуемого внимания.

В наиболее распространенном подходе, в том числе и в нашем случае, алгоритм классификации в ИМК-Р300 не использует априорную информацию о конкретных компонентах, анализируя ПСС во всем временном окне после подачи стимула. Поэтому точность классификации определяется совокупностью всех компонентов, амплитуда которых для эмоциогенных/целевых стимулов отличается от амплитуды нецелевых стимулов. В настоящей работе было выявлено, что наиболее информативными для классификации реакций ЭЭГ на разного рода стимулы являются компоненты ПСС N170, P200 и P300. Причем именно для компонента P200 выявлены наиболее интересные эффекты в отношении эмоциогенных стимулов.

В частности, в данной работе в задании, отчасти сходном с трехстимульной одбол-парадигмой [Katayama, Polich, 1999], амплитуда P200 в ответ на эмоциогенные стимулы вне фокуса внимания была выше, чем в задании с пассивным вниманием к тем же самым наборам стимульного материала (рис. 1). С одной стороны, в блоке с активным вниманием испытуемые получали инструкцию считать целевой стимул, и это задание могло отвлекать основной ресурс внимания на обработку целевых, но не эмоциогенных стимулов. С другой стороны, в блоке, где испытуемые пассивно смотрели на предъявляемые стимулы, общий уровень внимания к стимулам был ниже, поскольку отсутствовало какое-либо задание по активной дискриминации стимулов. Эти разнонаправленные эффекты могли бы привести к тому, что амплитуды ПСС в ответ на эмоциогенные стимулы могли быть больше в том

или другом случае, или не различаться, если бы данные факторы скомпенсировали друг друга. Однако, по-видимому, более высокий уровень внимания к задаче приводит к более явным различиям в реакциях на эмоциогенные и нейтральные стимулы, а обработка эмоционально значимых стимулов происходит независимо от обработки целевых стимулов. Последнее согласуется с результатами, полученными в [Asmaro et al., 2012; Asmaro et al., 2014] и подтверждает способность эмоционально окрашенных стимулов вызывать ответы в условиях сознательной обработки целевого стимула [Ohman et al., 2001].

Другим важным результатом в отношении компонента P200 является то, что в блоке (3) его амплитуда в ответ на эмоциогенные стимулы вне фокуса внимания была выше, чем в ответ на целевые нейтральные стимулы, которые испытуемые должны были считать (рис. 1). Хотя P200 является компонентом, во многом функционально схожим с P300, и оба являются чувствительными к наличию целевых признаков у стимула [Luck, 2005], компонент P200 отражает не только обработку характерных признаков стимула, но и связан с процессами восприятия эмоционально окрашенных стимулов [Carretie et al., 2004]. Такая чувствительность компонента P200 к наличию непроизвольного внимания к эмоциогенному стимулу, в особенности при высоком уровне внимания к предъявляемым стимулам, позволяет рассматривать данный компонент как потенциально значимый признак при детекции неявного фокуса внимания к эмоциогенным стимулам. По техническим причинам не было возможности проанализировать точность классификации отдельно для эмоциогенных стимулов в блоке (3) при наличии активного внимания к нейтральным стимулам, чтобы сравнить ее с точностью для эмоциогенных стимулов в блоке (2). Однако на основе изложенных результатов можно предположить, что в блоке (3) с активным вниманием точность для эмоциогенных стимулов могла бы быть выше и даже коррелировать с амплитудой P200.

В нашем исследовании в блоках с пассивным вниманием амплитуды компонентов N170 и P300 в ответ на эмоциогенные стимулы были выше для стимулов-изображений (блок 2), чем для стимулов-лиц (блок 1) (рис. 1). Использование стимулов на основе изображений лиц

обусловлено тем, что некоторые характеристики ПСС связаны именно с распознаванием лица как структуры [Cauquil et al., 2000], а также с различиями в эмоциональной окраске таких стимулов [Sprengelmeyer, Jentzsch, 2006]. Различия в амплитудах компонентов между двумя типами стимулов могут объясняться более четкой фиксацией взгляда на стимуле в случае изображений, которая является наиболее критичным фактором для амплитуды N170 [Treder et al., 2011; Frenzel et al., 2011], например, из-за более однообразного состава стимулов на основе фотографий лиц, по сравнению со стимулами на основе изображений, содержащих множество деталей. Более высокая амплитуда подобного негативного компонента при подпороговом предъявлении стимулов также наблюдалась в одной работе для стимулов-объектов, чем для стимулов-лиц [Mitsudo et al., 2011]. Точность классификации для изображений также была несколько выше, чем для фото человеческих лиц (хотя значимых различий не было), что, по-видимому, обусловлено более высокими амплитудами ПСС для изображений. Однако корреляция с точностью наблюдалась лишь для амплитуды компонента N170 в блоке с фотографиями лиц. Данный компонент обладает специфичностью в отношении обработки стимулов на основе изображений человеческих лиц [Cauquil et al., 2000], причем его амплитуда обычно выше для эмоциогенных лиц [Sprengelmeyer, Jentzsch, 2006], а при использовании данных стимулов в ИМК-Р300 было даже показано увеличение точности распознавания целевых команд [Kaufmann et al., 2013]. Функциональная роль данного компонента подтверждается в нашей работе его корреляцией с точностью классификации эмоциогенного лица, а более низкие абсолютные значения амплитуд по сравнению с изображениями могут объясняться его большей чувствительностью к типу самого стимула (лицо), чем к наличию у него эмоционального оттенка, которое отражено в анализируемых нами разностных ПСС. Также процессы аффективной обработки являются первичными только в случае, если соответствующие эмоциональные черты лица могут быть быстро и легко детектированы [Mueller et al., 2017], поэтому, возможно, в нашей работе различия в амплитудах ПСС между стимулами-лицами и изображениями были обусловлены менее интенсивной эмоциогенностью стимулов-лиц,

чем стимулов-изображений. В отличие от других компонентов, амплитуда P200 (в Pz) была выше именно для стимулов-лиц, чем для стимулов-изображений (рис. 1), что, с одной стороны, подтверждается существующими данными в отношении процессов обработки таких стимулов [Rossion, 2003], с другой – увеличивает отмеченную выше значимость использования этого компонента для детекции фокусов внимания к эмоциогенным стимулам на основе ИМК-Р300. Стоит отметить, что примерно с этой латентности (около 200 мс) начинают проявляться ПСС-корреляты при смещении внимания от неосознаваемого уровня к осознаваемому [Genetti et al., 2009]. По-видимому, отсутствие активного задания в первых двух блоках было наиболее критичным фактором для низкой амплитуды компонентов ПСС в этих блоках: например, для стимулов-лиц показана зависимость между степенью осознанности стимула и амплитудами ПСС [Genetti et al., 2009].

Несмотря на наличие ряда работ, где предпринимались попытки классификации зрительных стимулов по их эмоциональному оттенку, в том числе из базы стимулов IAPS [Mathieu et al., 2013; Singh et al., 2013; Singh et al., 2015], во всех них длительность предъявления стимула составляла от 1 до 2.5 секунд, что существенно больше, чем в нашем случае (200 мс с интервалом 500 мс). Большая длительность предъявления стимулов увеличивает затраты времени для накопления материала, что может быть критичным для систем автоматической детекции эмоциональных фокусов внимания и утомительным для самого пользователя. Несмотря на то, что в нашей работе средние показатели классификации эмоциогенных стимулов в условиях пассивного внимания являются невысокими, они сравнимы с результатами указанных выше и других существующих работ подобного рода, хотя зачастую не могут сравниваться напрямую друг с другом, ввиду использования во многих работах бинарной классификации (со случайным уровнем 50%). Также следует отметить, что в данной работе не ставилось задачи выявить влияние типа эмоциональной окраски стимулов, в то время как во многих подобных работах классифицируемые стимулы разделяются по валентности и силе эмоций. Вместе с тем полученные в нашей работе результаты

в совокупности с результатами других работ касательно особенностей ПСС в ответ на эмоционально окрашенные стимулы позволят подобрать более приемлемый стимульный материал, парадигмы предъявления стимулов и техники классификации, которые в совокупности будут способствовать созданию более эффективных систем для детекции эмоциональных фокусов внимания.

ВЫВОДЫ

1. Точность классификации эмоционально окрашенных стимулов, предъявляемых в парадигме пассивного внимания в рамках ИМК-Р300, превышала случайный уровень более чем вдвое, а для отдельных испытуемых достигала более высоких значений, сравнимых с точностью выбора команды в ИМК-Р300 с активным вниманием к целевому стимулу.
2. Амплитуда компонента Р200 в ответ на эмоциогенные стимулы вне фокуса внимания была выше при наличии более высокого уровня внимания к задаче. Также амплитуда Р200 была выше в ответ на эмоциогенные стимулы вне фокуса внимания, чем в ответ на целевые нейтральные стимулы, внимание к которым было привлечено явным образом согласно инструкции испытуемых.
3. Амплитуды компонентов N170 и Р300 в ответ на стимулы с изображениями различной тематики и сюжетов были выше, чем в ответ на стимулы с фотоизображениями человеческих лиц. В то же время стимулы на основе фотоизображений лиц обладали спецификой в эмоциональном восприятии: амплитуда компонента Р200 для них была выше, чем для изображений, а точность классификации прямо коррелировала с амплитудой компонента N170.

Работа выполнена при частичной поддержке фонда Национальной Технологической Инициативы по направлению “Нейронет”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ганин И.П., Каплан А.Я. Интерфейс мозг-компьютер на основе волны Р300: предъявление комплексных стимулов “подсветка + движение”. Журн. высш. нерв. деят. 2014. 64(1): 1–9.

- Скугаревская М.М., Хоменко Н.В. Нарушение распознавания эмоций и памяти на лица как маркер риска развития психоза. Психическое здоровье. 2013. 11: 32–36.
- Alqasemi R., Dubey R. A 9-DoF Wheelchair-Mounted Robotic Arm System: Design, Control, Brain-Computer Interfacing, and Testing. Journal of Advances in Robot Manipulators. Ed. Hall E. Publisher: InTech, 2010. 51–78 pp.
- Asmaro D., Jaspers-Fayer F., Sramko V., Taake I., Carolan P., Liotti M. Spatiotemporal dynamics of the hedonic processing of chocolate images in individuals with and without trait chocolate craving. Appetite. 2012. 58(3): 790–9.
- Asmaro D., Carolan P.L., Liotti M. Electrophysiological evidence of early attentional bias to drug-related pictures in chronic cannabis users. Addict Behav. 2014. 39(1): 114–121.
- Bernat E., Shevrin H., Snodgrass M. Subliminal visual oddball stimuli evoke a P300 component. Clin Neurophysiol. 2001. 112(1): 159–171.
- Carreti L., Hinojosa J.A., Martin-Loeches M., Mercado F., Tapia M. Automatic attention to emotional stimuli: Neural correlates. Human Brain Mapping. 2004. 22(4): 290–299.
- Cauquil A.S., Edmonds G.E., Taylor M.J. Is the face-sensitive N170 the only ERP not affected by selective attention? Neuroreport. 2000. 11: 2167–2171.
- Farwell L.A., Donchin E. Talking off the top of your head: toward a mental prosthesis utilizing event-related brain potentials. Electroencephalography and Clinical Neurophysiology. 1988. 70: 510–523.
- Frenzel S., Neubert E., Bandt C. Two communication lines in a 3 × 3 matrix speller. J Neural Eng. 2011. 8(3): 036021 (6 pp.).
- Genetti M., Khateb A., Heinzer S., Michel C.M., Pegna A.J. Temporal dynamics of awareness for facial identity revealed with ERP. Brain Cogn. 2009. 69(2): 296–305.
- Guger C., Daban S., Sellers E., Holzner C., Krausz G., Caraballona R., Gramatica F., Edlinger G. How many people are able to control a P300-based brain-computer interface (BCI)? Neurosci Lett. 2009. 462(1): 94–98.
- Hancock P. Psychological Image Collection at Stirling (PICS). Web address: <http://pics.stir.ac.uk/>. European Conference on Visual Perception in Utrecht, 2008.
- Hobson R.P., Ouston J., Lee A. Emotion recognition in autism: Coordinating faces and voices. Psychological medicine. 1988. 18(4): 911–923.
- Katayama J., Polich J. Auditory and visual P300 topography from a 3 stimulus paradigm. Clinical Neurophysiology. 1999. 110(3): 463–468.
- Kaufmann T., Schulz S.M., Köblitz A., Renner G., Wessig C., Kübler A. Face stimuli effectively prevent brain-computer interface inefficiency in patients with neurodegenerative disease. Clinical Neurophysiology. 2013. 124: 893–900.
- Lang P.J., Bradley M.M., Cuthbert B.N. International affective picture system (IAPS): Affective ratings of pictures

- and instruction manual. Technical Report A-8. University of Florida, Gainesville, FL. 2008.
- Lopes A.C., Pires G., Vaz L., Nunes U.* Wheelchair navigation assisted by human-machine shared-control and a P300-based brain computer interface. International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2011. 2438–2444.
- Luck S.J.* An Introduction to the Event-Related Potential Technique. The MIT Press, 2005. 388 p.
- Mathieu N.G., Bonnet S., Harquel S., Gentaz E., Campagne A.* Single-trial ERP classification of emotional processing. 6th International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering (NER). 2013. 101–104.
- Mitsudo T., Kamio Y., Goto Y., Nakashima T., Tobimatsu S.* Neural responses in the occipital cortex to unrecognizable faces. Clin Neurophysiol. 2011. 122(4): 708–718.
- Mueller C.J., Fritsch N., Hofmann M.J., Kuchinke L.* Differences in the dynamics of affective and cognitive processing—An ERP study. Brain Res. 2017. 1655: 41–47.
- Nijboer F., Sellers E.W., Mellinger J., Jordan M.A., Matuz T., Furdea A., Halder S., Mochty U., Krusienski D.J., Vaughan T.M., Wolpaw J.R., Birbaumer N., Kubler A.* A P300-based brain-computer interface for people with amyotrophic lateral sclerosis. Clinical neurophysiology. 2008. 119(8): 1909–1916.
- Ohman A.* Preattentive processes in the generation of emotions. Cognitive perspectives on emotion and motivation. Ed. Hamilton V., Bower G.H., Frijda N.H. Springer Netherlands, 1988. 127–143 pp.
- Ohman A., Flykt A., Esteves F.* Emotion drives attention: detecting the snake in the grass. Journal of experimental psychology: general. 2001. 130(3): 466–478.
- Picton T.W.* The P300 wave of the human event-related potential. Journal of Clinical Neurophysiology: Official Publication of the American Electroencephalographic Society. 1992. 9: 456–479.
- Polich J.* P300 from a passive auditory paradigm. Electroencephalogr Clin Neurophysiol 1989. 74: 312–320.
- Rossion B., Cottrell G.W., Joyce C.A., Tarr M.J.* Early laterization and orientation tuning for face, word, and object processing in the visual cortex. NeuroImage. 2003. 20: 1609–1624.
- Schalk G., McFarland D.J., Hinterberger T., Birbaumer N., Wolpaw J.R.* BCI2000: a general-purpose brain-computer interface (BCI) system. IEEE Transactions on biomedical engineering. 2004. 51(6): 1034–1043.
- Schupp H.T., Junghöfer M., Weike A.I., Hamm A.O.* Attention and emotion: an ERP analysis of facilitated emotional stimulus processing. Neuroreport. 2003. 14(8): 1107–1110.
- Singh M., Singh M.M., Singhal N.* Emotion Recognition along Valence Axis Using Naïve Bayes Classifier. International Journal of Information Technology & Knowledge Management. 2013. 7(1): 51–55.
- Singh M., Singh M., Goyal M.* Selection of attribute combinations of ERP's for classification of emotions along arousal axis. International Journal of Information Technology Knowledge Management. 2015. 8(2): 142–149.
- Sprengelmeyer R., Jentsch I.* Event related potentials and the perception of intensity in facial expressions. Neuropsychologia. 2006. 44: 2899–2906.
- Stavropoulos K.K., Viktorinova M., Naples A., Foss-Feig J., McPartland J.C.* Autistic traits modulate conscious and nonconscious face perception. Soc Neurosci. 2016. 10: 1–12.
- Treder M.S., Schmidt N.M., Blankertz B.* Gaze-independent brain-computer interfaces based on covert attention and feature attention. J. Neural. Eng. 2011. 8: 066003 (12 pp.).
- Vidaurre C., Klauer C., Schauer T., Ramos-Murguialday A., Müller K.R.* EEG-based BCI for the linear control of an upper-limb neuroprosthesis. Medical Engineering Physics. 2016. 38(11): 1195–1204.
- Wang S., Zhao Y., Chen S., Lin G., Sun P., Wang T.* EEG biofeedback improves attentional bias in high trait anxiety individuals. BMC Neurosci. 2013. 14: 115 (8 pp.).
- Wolpaw J.R.* Brain-computer interfaces as new brain output pathways. J. Physiol. 2007. 579(3): 613–619.

PROPERTIES OF EEG RESPONSES TO EMOTIONALLY SIGNIFICANT STIMULI IN P300-BASED BRAIN-COMPUTER INTERFACE

I. P. Ganin, E. A. Kosichenko, A. Ya. Kaplan

*Lomonosov Moscow State University, Moscow
e-mail: ipganin@mail.ru*

P300-based brain-computer interface (P300 BCI) enables to detect the focus of human's attention to specific stimuli on the computer screen by analyzing the difference of EEG features between target and non-target stimuli reactions. Typically, in the P300 BCI paradigm the subjects' attention to the exact stimulus is caused by their practical interest to this stimulus, researcher's instructions or deviance of this stimulus (its clear distinction from other stimuli).

In this work we investigate the properties of perception of stimuli with subjective emotional significance presented in oddball-paradigm. We also research the possibility of using P300 BCI for detection of covert focuses of attention. Hypothetically, this technology can be used for testing the person's ability of the emotional stimuli perception, which could be applied for the instrumental diagnostics of accentuated conditions or emotional perception disorders like autism.

This study on 14 healthy subjects showed that the accuracy of the passively presented emotional stimuli recognition (without the stimuli discrimination task) significantly exceeded the random level more than twice. We also found out the characteristic features of the ERP components evoked by the various images and under the conditions of low and high level of attention to the presented stimuli. The obtained results prove the hypothesis that P300 BCI paradigm can be used to detect covert attentional focuses to the external stimuli and complete the existing findings of the brain mechanisms responsible for the unconscious perception of the subjectively significant stimuli.

Keywords: brain-computer interface (BCI), electroencephalogram (EEG), event-related potentials (ERP), visual attention, P300 wave.